

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**AUTOMATIZOVANÝ TESTBED SENZORŮ OPONENTA U  
ROBOTŮ KATEGORIE MINISUMO**

AUTOMATIC TESTBED FOR OPPONENT SENSORS OF MINISUMO ROBOTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Radvanský**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Lázna**

**BRNO 2020**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Martin Radvanský

**ID:** 203331

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### **Automatizovaný testbed senzorů oponenta u robotů kategorie minisumo**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je vývoj automatizovaného testbedu, který má sloužit k testování parametrů různých typů čidel pro detekci oponenta v robotické soutěži minisumo v definovaných podmínkách.

1. Proved'te rešerši senzorů oponenta pro roboty kategorie mini sumo.
2. Navrhněte zařízení pro měření vlastností senzorů.
3. Sestavte a proveďte oživení mechanické a elektronické části testbedu.
4. Navrhněte a vytvořte software pro automatizované měření vlastností senzorů.
5. Zhodnoťte vlastnosti testovaných senzorů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MARTINEK, Radislav. Sensory v průmyslové praxi. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-114-4.
- [2] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. Cham : Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 978-3-319-19302-1

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Lázna

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a vytvořením automatizovaného testbedu pro měření změn detekčních charakteristik IR senzorů při působení vnějších světelných rušivých vlivů. Měření je prováděno při simulaci denního osvětlení, umělého osvětlení a IR rušení. Součástí této práce je i vytvoření rozhodovacího systému pro hodnocení senzorů v závislosti na jejich vlastnostech, pro použití v soutěžích minisumo.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Testbed, Raspberry Pi, Arduino, IR senzor, detekční charakteristiky

## ABSTRACT

Aim of this bachelor thesis is the design and creation of an automated testbed for measuring changes in the detection characteristics of IR sensors under the influence of external light interference. The measurement is performed in the simulation of daylight, artificial lighting and IR interference. Part of this work is the creation of a decision system for evaluating sensors depending on their properties, for use in minisumo competitions.

## KEYWORDS

Testbed, Raspberry Pi, Arduino, IR sensor, detection characteristics

RADVANSKÝ, Martin. *Automatizovaný testbed senzorů oponenta u robotů kategorie minisumo*. Brno, 2020, 98 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Lázna



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Automatizovaný testbed senzorů opo-  
nenta u robotů kategorie minisumo“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího  
bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou  
všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením  
této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl  
nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových  
a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zá-  
kona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským  
a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně  
možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4  
Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 7.6. 2020

.....  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Láznovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno      7.6. 2020

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Základní principy IR senzorů</b>	<b>14</b>
1.1 Robotická soutěž minisumo	14
1.1.1 Pravidla soutěže	15
1.1.2 Soutěžní prostředí	15
1.1.3 Umístění senzorů oponenta	16
1.1.4 Typy senzorů užívaných pro detekci oponenta	16
1.2 Principy činnosti IR senzorů překážky	19
1.2.1 Měření přítomnosti předmětu – reflexní senzory	20
1.2.2 Určení vzdálenosti předmětu pomocí triangulace	21
1.2.3 Metoda TOF – doba letu paprsku	23
1.2.4 Získání výstupu ze senzorů	24
1.2.5 Vliv prostředí na činnost senzoru	24
1.2.6 Optická modulace signálu	25
1.3 Senzory používané pro soutěž minisumo	27
1.3.1 Panasonic AMBA240906	27
1.3.2 DFRobot infračervený senzor SEN0164	28
1.3.3 Infračervený senzor překážky E18-D80NK	29
1.3.4 Sharp GP2Y0A60SZ0F	29
1.3.5 JSUMO JS40F	30
1.3.6 Digitální senzor překážky Pololu	30
1.3.7 Ultrazvukový snímač HC-SR04	31
<b>2 Návrh testbedu</b>	<b>33</b>
2.1 Požadavky na zařízení	33
2.2 Metoda způsobu řešení uživatelských požadavků	34
2.2.1 Působení cizího senzoru	34
2.2.2 Rušivé ambientní osvětlení	34
2.2.3 Působení umělých světelných zdrojů	34
2.2.4 Ověření rozsahu detekce překážky senzorem	34
2.3 Řídící jednotky použité v práci	35
2.3.1 Arduino Due	35
2.3.2 Raspberry Pi 4 Model B	35
2.4 Realizace jednotlivých částí testbedu	36
2.4.1 Mechanická konstrukce testbedu	36
2.4.2 Blokové schéma testbedu	38

2.4.3	Blokové schéma části měřeného snímače . . . . .	40
2.4.4	Blokové schéma řízení simulace osvětlení . . . . .	42
2.4.5	Blokové schéma řízení simulace rušení . . . . .	43
2.4.6	Blokové schéma části řízení motorů . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Ovládací software</b>	<b>46</b>
3.1	Ovládání hardwaru pomocí Arduino Due . . . . .	46
3.1.1	Vývojový diagram softwaru Arduina Due . . . . .	47
3.2	Skripty pro Raspberry Pi . . . . .	49
3.2.1	Hlavní skript testbedu . . . . .	49
3.2.2	Skript pro získání IR snímku . . . . .	51
3.2.3	Skript pro konverzi dat . . . . .	51
3.2.4	Pomocné skripty . . . . .	52
3.3	Ovládací program testbedu . . . . .	53
3.3.1	Node-RED – Uživatelské rozhraní . . . . .	53
3.3.2	Nastavení průběhu testu senzoru . . . . .	54
3.3.3	Průběh testů a výsledky . . . . .	56
3.3.4	Informace o verzi firmwaru . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>59</b>
4.1	Měřené parametry snímačů . . . . .	59
4.2	Vliv IR rušení na detekční vzdálenost . . . . .	60
4.3	Ozářená plocha snímačem . . . . .	61
4.4	Naměřené výsledky jednotlivých snímačů . . . . .	62
4.4.1	Senzor AMBA 240906 s digitálním výstupem . . . . .	62
4.4.2	Senzor SHARP GP2Y0A60SZ0F s analogovým výstupem . . . . .	64
4.4.3	Senzor JSUMO JS40 s digitálním výstupem . . . . .	65
4.4.4	Senzor DFRobot SEN0164 s digitálním výstupem . . . . .	66
4.4.5	Senzor E18-D80NK s digitálním výstupem . . . . .	68
4.4.6	Digitální senzor překážky Pololu . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Zhodnocení výsledků</b>	<b>71</b>
5.1	Hodnotící kritéria . . . . .	71
5.2	Srovnání parametrů senzorů . . . . .	71
5.3	Vytvoření škály hodnotících kritérií . . . . .	72
5.3.1	Metodika přiřazení stupňů k parametrům snímače . . . . .	72
5.4	Porovnání naměřených charakteristik . . . . .	73
5.5	Výběr optimálního senzoru s využitím fuzzy logiky . . . . .	75
5.5.1	Proces fuzzy zpracování dat . . . . .	75
5.5.2	Vytvoření fuzzy rozhodovacího systému . . . . .	76

5.5.3	Zhodnocení senzorů s prioritou detekce oponenta . . . . .	78
5.5.4	Zhodnocení senzorů s prioritou odolnosti vůči IR rušení . . . .	78
5.5.5	Zhodnocení výsledků rozhodovacího systému . . . . .	78
<b>Závěr</b>		<b>80</b>
<b>Literatura</b>		<b>81</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>		<b>85</b>
<b>Seznam příloh</b>		<b>86</b>
<b>A</b>	<b>Schéma desky pro připojení senzoru</b>	<b>87</b>
<b>B</b>	<b>Schéma desky ovladačů LED</b>	<b>88</b>
<b>C</b>	<b>Schéma desky ovládání vysílačů IR LED</b>	<b>89</b>
<b>D</b>	<b>Schéma desky pro ovládání motorů</b>	<b>90</b>
<b>E</b>	<b>Ukázka log souboru testu</b>	<b>91</b>
<b>F</b>	<b>Node-RED - Definice stránky průběhu testu</b>	<b>92</b>
<b>G</b>	<b>Node-RED - Definice stránky nastavení testu</b>	<b>93</b>
<b>H</b>	<b>Node-RED - Definice proměnných</b>	<b>94</b>
<b>I</b>	<b>Vstupní převodní a transformační matice</b>	<b>95</b>
<b>J</b>	<b>Stavová matice senzorů I</b>	<b>96</b>
<b>K</b>	<b>Stavová matice senzorů II</b>	<b>97</b>
<b>L</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>98</b>

# Seznam obrázků

1.1	Ukázka souboje minisumo . . . . .	14
1.2	Konstrukce profesionální . . . . .	16
1.3	Používané konstrukce robotů . . . . .	17
1.4	Příklad infračerveného snímače . . . . .	18
1.5	Příklad laserového snímače . . . . .	18
1.6	Příklad ultrazvukového snímače . . . . .	19
1.7	Světelné spektrum . . . . .	19
1.8	Reflexní difuzní senzory . . . . .	20
1.9	Triangulační metoda . . . . .	21
1.10	Optoelektronická triangulace . . . . .	22
1.11	TOF . . . . .	23
1.12	Rušivé vlivy ovlivňující snímání optosenzoru . . . . .	25
1.13	Spektrum různých zdrojů světla . . . . .	25
1.14	Modulace signálu . . . . .	26
1.15	Příklad blokového schématu IR přijímače/demodulátoru . . . . .	26
1.16	Snímač AMBA 240906 . . . . .	28
1.17	Snímač DFRobot SEN0164 . . . . .	28
1.18	Snímač E18-D80NK . . . . .	29
1.19	Snímač Sharp GP2Y0A60SZ0F . . . . .	30
1.20	Snímač JSUMO JS40F . . . . .	30
1.21	Snímač od firmy Pololu . . . . .	31
1.22	Snímač HC-SR04 . . . . .	32
1.23	Detekční charakteristika senzoru HC-SR04 . . . . .	32
2.1	Arduino Due . . . . .	35
2.2	Raspberry Pi 4 Model B . . . . .	36
2.3	Mechanická konstrukce 1 . . . . .	37
2.4	Stojan pro upevnění kamery a testovaného senzoru . . . . .	37
2.5	Promítací plátno . . . . .	38
2.6	Pohled na přední část testbedu . . . . .	39
2.7	Blokové schéma testbedu . . . . .	40
2.8	Blokové schéma měřeného snímače . . . . .	41
2.9	Osazený plošný spoj pro zapojení měřeného snímače . . . . .	41
2.10	Blokové schéma řízení simulace osvětlení . . . . .	42
2.11	Osazený plošný spoj s funkcí řízení simulace osvětlení . . . . .	43
2.12	Blokové schéma řízení simulace rušení . . . . .	43
2.13	Osazený plošný spoj pro řízení simulace rušení . . . . .	44
2.14	Blokové schéma řízení motorů . . . . .	45

2.15	Osazený plošný spoj pro řízení motorů . . . . .	45
3.1	Schéma rozmístění částí software . . . . .	46
3.2	Vývojový diagram softwaru pro Arduino Due . . . . .	48
3.3	Schéma propojení skriptů testbedu . . . . .	50
3.4	Vykreslená charakteristika senzoru . . . . .	52
3.5	Ukázka propojení uzlů v prostředí Node-RED . . . . .	54
3.6	Nastavení konfigurace testu . . . . .	55
3.7	Webová stránka s průběhem testu . . . . .	57
3.8	Webová stránka o aplikaci . . . . .	58
4.1	Připojení a umístění testovaného snímače . . . . .	59
4.2	Detailní pohled na testovací objekt . . . . .	60
4.3	Vliv IR rušení na detekční vzdálenost . . . . .	61
4.4	Ozářená plocha senzorem . . . . .	62
4.5	Základní charakteristika snímače AMBA . . . . .	63
4.6	Charakteristika snímače AMBA 240906 při IR rušení . . . . .	63
4.7	Ozářená plocha vysílačem snímače AMBA 240906 . . . . .	63
4.8	Základní charakteristika snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F . . . . .	64
4.9	Charakteristika snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F při IR rušení . . . . .	64
4.10	Ozářená plocha vysílačem snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F . . . . .	65
4.11	Základní charakteristika snímače JSUMO JS40 . . . . .	65
4.12	Charakteristika snímače JSUMO JS40 při IR rušení . . . . .	66
4.13	Ozářená plocha vysílačem snímače JSUMO . . . . .	66
4.14	Základní charakteristika snímače DFRobot SEN0164 . . . . .	67
4.15	Charakteristika snímače DFRobot SEN0164 při IR rušení . . . . .	67
4.16	Ozářená plocha vysílačem snímače DFRobot SEN0164 . . . . .	67
4.17	Základní charakteristika snímače E18-D80NK . . . . .	68
4.18	Charakteristika snímače E18-D80NK při IR rušení . . . . .	68
4.19	Ozářená plocha vysílačem snímače E18-D80NK . . . . .	69
4.20	Základní charakteristika snímače POLOLU . . . . .	69
4.21	Charakteristika snímače POLOLU při IR rušení . . . . .	70
5.1	Rozhodování řešené fuzzy zpracováním . . . . .	75
5.2	Část vstupní převodní tabulky . . . . .	76
5.3	Část transformační matice . . . . .	77
5.4	Retransformační matice rozhodovacího systému . . . . .	77
5.5	Hodnocení senzorů s preferencí detekce oponenta . . . . .	78
5.6	Hodnocení senzorů s preferencí odolnosti vůči IR . . . . .	79

# Seznam tabulek

5.1	Tabulka základních parametrů senzorů . . . . .	72
5.2	Tabulka hodnocení vhodnosti senzorů . . . . .	73



# Úvod

Robotika a automatizace je nedílnou součástí dnešní doby a ovlivňuje naše životy ve stále větší míře. Stejně jako v minulosti, kdy zavádění výpočetní techniky vyžadovalo od lidí, aby své vzdělání a schopnosti rozšířili o znalost a obsluhy počítačů, tak i robotika a automatizace se dostává do stejného postavení. Pro konkurenceschopnost firem je nezbytné zavádění moderních technologií ve výrobních procesech, a tím pádem se očekávají i odpovídající znalosti a schopnosti zaměstnanců.

Současný školský systém se teprve malými krůčky snaží na tuto situaci reagovat a žáci středních, převážně technicky zaměřených škol, jsou seznamováni se základními poznatky v oblasti robotiky a automatizace. Nejlepším způsobem, jak lze taje tohoto oboru předávat dál, je zapojení žáků do různých soutěží a aktivit, které jim umožní, aby získané teoretické poznatky byli schopni aplikovat v praxi. Tímto způsobem lze nenásilnou a přitom zábavnou formou prohlubovat jejich znalosti, a tím i jejich potenciální cenu na trhu práce.

U nás i ve světě existuje množství soutěží, kde mohou nadšenci do robotiky porovnávat své schopnosti. Součástí téměř každé soutěže bývá často několik samostatných kategorií, které jsou zaměřeny na jiný aspekt robotiky či automatizace. Mezi nejznámější reprezentanty těchto kategorií patří sledovače čáry (simulující pohyb autonomního robota po určené – vyznačené dráze) a souboje robotů (nazvaných podle podobnosti s tradičním japonským zápasem v ringu) Sumo. Účast na těchto soutěžích je prestižní záležitostí a účastníci si mohou kromě hodnotných cen odnést i často nenahraditelné zkušenosti počínaje týmovou spoluprací až po neotřelá konstrukční či algoritmická řešení.

Účastnit se takových akcí není jen o samotném přihlášení se a zaplacení registračního poplatku, ale především to znamená provést důkladný návrh celého robota, se kterým se chceme do soutěže zapojit. Tento zdánlivě jednoduchý krok v sobě zahrnuje tři základní části, mezi které patří návrh konstrukce robota, rozvržení senzorického subsystému a vlastní řídicí software. Problematika, jak postavit robota po stránce konstrukční, tak i po programové, je velice náročná. Existuje celá řada skupin lidí počínaje školními týmy a privátními konče. Je tu i řada komerčních výrobců komponent, kteří mají své vlastní týmy a prodávají ostatním již osvědčené komponenty, či celá řešení.

Hlavní výzvou pro konstruktéra robota sumo je především vysoce spolehlivá detekce soupeře. Robot a jeho snímače se musí potýkat s mnoha okolními vlivy, které mohou způsobit, že se robot nechová podle očekávání. Může to být například osvětlení v místnosti, kde se odehrává zápas, zejména se jedná o umělé zářivkové osvětlení, ale i sluneční záření pronikající do místnosti při nevhodném umístění soutěžního ringu. Dalším problémem mohou být samotní diváci v okolí hracího prostoru. Je-

jich mobilní telefony či fotoaparáty, které pořizují snímky s bleskem, dokáží dočasně oslepit oba roboty v ringu, a tím narušit celý probíhající zápas. Díky obdobným problémům se může robot snadno vyřadit i sám, a tím prohrát kolo nebo dokonce skončit v celém turnaji.

Aby byl konstruktér robota na uvedené problémy připraven a náležitě je v řídicím software ošetřil, je nutné nalézt pokud možno všechny potenciální zdroje rušení a samozřejmě mít dokonalý přehled o chování senzorického subsystému v takovém prostředí. Podrobná znalost, jak se použitý senzor chová, pokud není provozován přesně podle specifikací výrobce, jenž často okolní vlivy ani v produktových listech neuvádí, hraje významnou roli v celkové úspěšnosti v soutěžích. Jak ověřit chování senzoru v podmínkách reálného použití v nepříznivém prostředí není v amatérských podmínkách vůbec snadné a právě na tento problém se práce zaměřuje.

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením automatizovaného testbedu pro ověření detekčních schopností IR senzorů používaných k detekci oponenta v soutěžích minisumo. Úvodní kapitoly obsahují popis základních principů IR senzorů překážky a popis vlastností vybraných senzorů oponenta. Hlavní část této práce je tvořena návrhem mechanické a elektrické části testbedu. Nedílnou součástí je i vytvoření softwaru pro ovládání celého zařízení a zobrazení výsledků. Poslední část tvoří porovnání výsledků pro vybrané senzory.

# 1 Základní principy IR senzorů

V této části práce budou nejprve představeny základní informace o soutěži minisumo, aby byl čtenář seznámen s prostředím a způsobem, jak robotická soutěž pro roboty kategorie minisumo probíhá. Realizace testovací stolice IR senzorů vyžaduje znalost principů a fungování IR senzorů. V dalším textu budou tedy popsány vybrané základní principy jejich činnosti a závěr kapitoly je pak věnován stručnému představení často používaných senzorů oponenta v minisumo robotech.

## 1.1 Robotická soutěž minisumo

Jednou z nejoblíbenějších robotických soutěží jsou robotí zápasy sumo (obrázek 1.1), konkrétně kategorie minisumo. Jejich oblíbenost vychází z toho, že pro roboty jsou dány omezení rozměru a váhy takovým způsobem, že je lze snadno sestavovat v domácích či školních podmínkách. Princip zápasu robotů je velmi jednoduchý, cílem souboje robotů je vytlačit soupeřova robota mimo ohraničenou část ringu.

Existuje velmi atraktivní varianta této soutěže tzv. deathmatch, kdy se na plochu ringu položí několik robotů současně a vyhrává ten, který zůstane jako poslední uvnitř hracího pole. Hrací plocha, kde dochází k souboji robotů je kruhovitěho tvaru s černým povrchem, jehož okraje jsou ohraničeny bílou čarou s tloušťkou přibližně 2,5 centimetrů. Poblíž středu plochy jsou umístěny dvě hnědé startovací značky pro počáteční umístění robotů.



Obr. 1.1: Souboj minisumo [1]

### 1.1.1 Pravidla soutěže

Základním kritériem souboje je striktní dodržení rozměrů a hmotnosti. V kategorii minisumo jsou maximální povolené hodnoty stanoveny na hmotnost 500 g a vnější půdorysný rozměr pak na  $100 \times 100$  mm. Vertikální rozměr robota není nijak omezen a je povoleno modifikovat rozměry robota po odstartování zápasu. Robot nesmí svou činností poškodit soupeřova robota ani samotnou hrací plochu. Je zakázáno využívat jakýkoliv prostředků pro útok vedoucí k potenciálnímu nebezpečí pro rozhodčí či diváky.

Jak již bylo psáno dříve, podmínkou vítězství je vytlačit soupeře z ringu. Hraje se obvykle na 2 vítězná kola. Hráči si vylosují, kdo první umístí robota, přičemž ten druhý dostává výhodu pro natočení robota. Okamžikem položení na hrací plochu obsluha již nesmí s robotem dále manipulovat kromě odstartování. Robot musí být zcela autonomní po dobu trvání soutěžního zápasu a samozřejmě nesmí být nijak dálkově řízen.

### 1.1.2 Soutěžní prostředí

Robotická soutěž obvykle probíhá ve vnitřních prostorách budov, často se jedná o sportovní haly nebo foyer historických budov. Zde často dochází k interakci mezi denním světlem s osvětlením umělým. Umělé osvětlení je tvořeno různou kombinací zářivkových, halogenových, či LED svítidel. Současně dochází ke změnám osvětlení prostoru způsobeného slunečním svitem a jeho kolísáním s pohybem oblačnosti. To způsobuje, že se světelné podmínky, co se týká jeho spektra, frekvence a intenzity neustále mění.

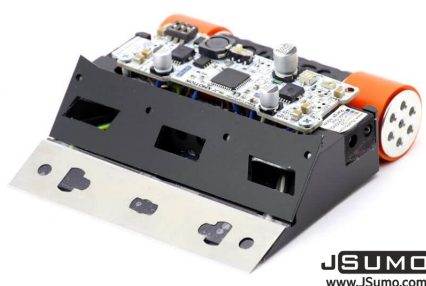
Další neopomenutelnou skutečností, která ovlivňuje charakteristiku osvětlení hracího prostoru jsou samotní diváci. Tito, ač jsou v bezpečné vyhrazené vzdálenosti od hracího prostoru, často používají své mobilní telefony pro záznam a fotografování. Při použití blesku, či přídatného osvětlení pro natáčení kamerových záznamů dochází k dalšímu možnému ovlivnění v osvětlení prostoru. Ze vlastních zkušeností je ověřeno, že blesk působí na IR čidla takovým způsobem, že dochází k detekci oponenta, i když se žádný nenachází v zorném poli senzoru. Proto se jedná o jeden z velmi rizikových faktorů během zápasu, který může rozhodnout o vítězi a poraženém.

U robotů kategorie minisumo je nepsaným standardem, že vzhledem k ceně, velikosti a hmotnosti jsou převážně používány IR senzory. V závislosti na jejich počtu, vysílacímu výkonu a umístění, dochází k většímu či menšímu vzájemnému ovlivňování detekčních schopností u obou robotů.

### 1.1.3 Umístění senzorů oponenta

Konstrukce robota minisumo je jedním z nejdůležitějších parametrů, které se podílí na celkové úspěšnosti v soutěži. Striktní dodržení rozměrů má za následek, že je konstruktér výrazně omezen velikostí, hmotností a počtem použitých senzorů. Na následujících obrázcích (1.2 a 1.3 a–e) jsou ukázky možného umístění senzorů oponenta na robotech, které jsou běžně v soutěžích používány. Z uvedených příkladů vyplývá, že čelní strana robota je vybavena minimálně jedním senzorem, který je využíván pro vyhledání oponenta. Chování robota je programově upraveno tak, aby se neustále snažil protivníka udržet v zorném poli čelního senzoru.

Toto chování způsobuje, že dochází k velmi silným vzájemným interakcím mezi senzory protivníků, a tím i ovlivňování jejich funkčnosti v případě, že využívají stejného principu detekce. Rostoucí počet senzorů způsobuje, že je snížena schopnost správné detekce téměř na minimum. Navrhované měřicí zařízení je tedy nezbytným předpokladem pro pochopení, jakým způsobem je senzor ovlivňován působením protivníka, a tím je pak možné pokusit se navrhnout odpovídající protiopatření na minimalizaci tohoto nepříznivého stavu.



Obr. 1.2: Profesionální konstrukce robota [2]

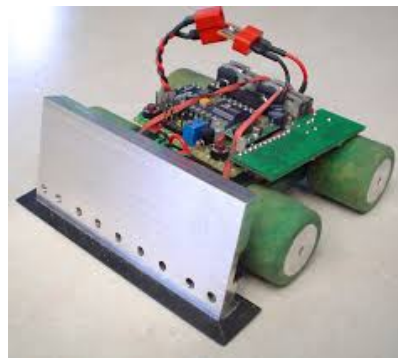
### 1.1.4 Typy senzorů užívaných pro detekci oponenta

Jak již bylo zmíněno dříve, je volba senzorického subsystému soutěžního robota ovlivněna několika základními požadavky, mezi kterými musí konstruktér vždy zvolit kompromis. Mezi tyto požadavky například patří:

- rychlost detekce;
- detekční vzdálenost;
- šířka zorného pole senzoru;
- rozměry;
- hmotnost;
- cena.



(a)



(b)



(c)



(d)



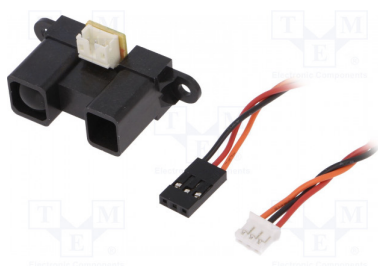
(e)

Obr. 1.3: Používané konstrukce robotů

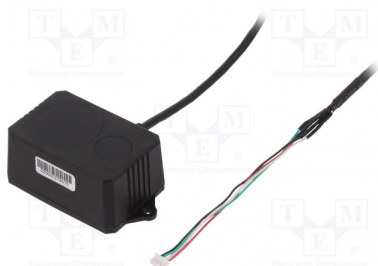
[3],[4],[5],[6],[7]

Přestože jsou soutěže robotů na vysoce profesionální úrovni, používané senzory jsou na základě uvedených kritérií vybírány především z průmyslově vyráběných senzorů, které jsou primárně určeny pro průmyslové aplikace do nejrůznějších zařízení. Nejčastěji se používají snímače využívající k detekci odrazu infračerveného záření, ze kterých jsou využívány zejména senzory detekce překážek nebo měření vzdálenosti, viz. obrázek 1.4. Tyto senzory jsou schopny po pečlivém výběru zajistit dostatečně rychlou detekci oponenta, při relativně snadné dostupnosti s příznivou cenou. Alternativně lze využít i kvalitnějších, ale bohužel i finančně náročných laserových snímačů, obrázek 1.5.

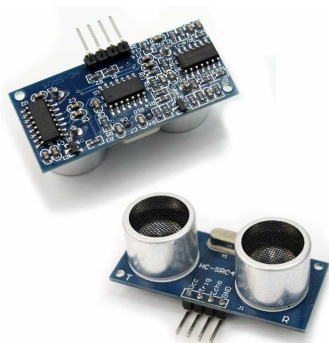
Pro porovnání je zde uveden i ultrazvukový senzor, viz obrázek 1.6, který je sice cenově nejvýhodnější, ale podle zkušeností a testů je v podstatě nepoužitelný pro tento druh aplikace. Ultrazvukový senzor svým principem echolokace, má reakční dobu řádově pomalejší v porovnání s IR senzory při současně velmi širokém úhlu detekce. Tím dochází ke zcela zásadnímu problému při detekci, protože i když soupeře detekujeme, nejsme schopni určit dostatečně přesně, kde se oponent nachází.



Obr. 1.4: Infračervený snímač [8]



Obr. 1.5: Laserový snímač [9]

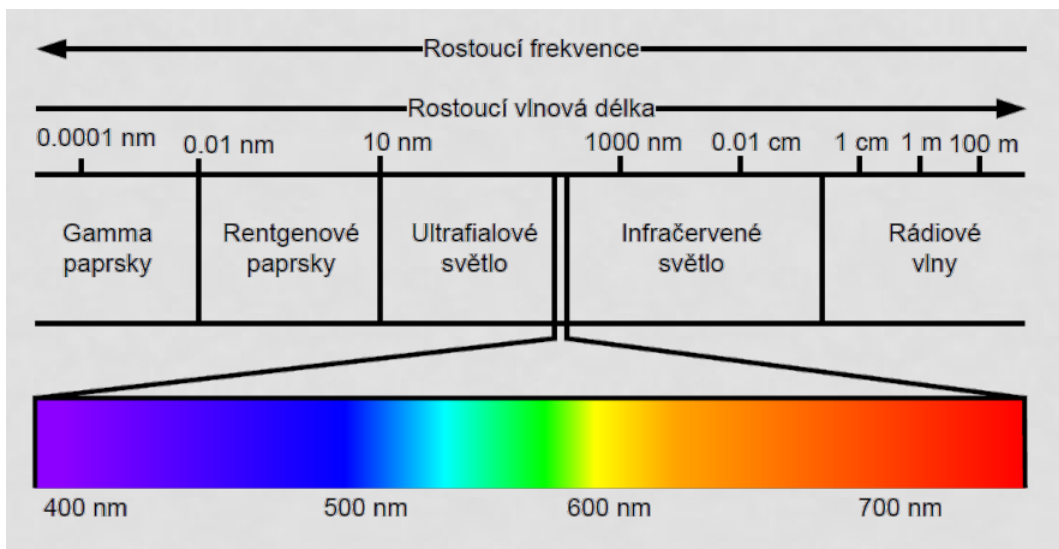


Obr. 1.6: Ultrazvukový snímač [10]

## 1.2 Principy činnosti IR senzorů překážky

Infračervený senzor má velice rozmanité možnosti použití. Jeho nejčastější využití spočívá v detekci přiblížení tělesa k senzoru, ať už se jedná o překážku robota, papír v tiskárně, měření otáček kola nebo počítání krabic na dopravníkovém páse.

Senzor funguje za pomoci zdroje infračerveného záření a jeho detektoru. Na obrázku 1.7 je zobrazeno spektrum elektromagnetického vlnění se zvýrazněnou oblastí viditelného světla. Infračervenou oblast elektromagnetického záření dělíme do skupin IR-A v rozsahu 780–1400 nm, IR-B 1400–3000 nm, IR-C 3000–10000 nm. V dalších kapitolách budou popsány senzory, které pracují v oblasti IR-A, a to konkrétně s vlnovými délkami 850 nm a 940 nm.



Obr. 1.7: Elektromagnetické vlnění a jeho vlnové délky [11]



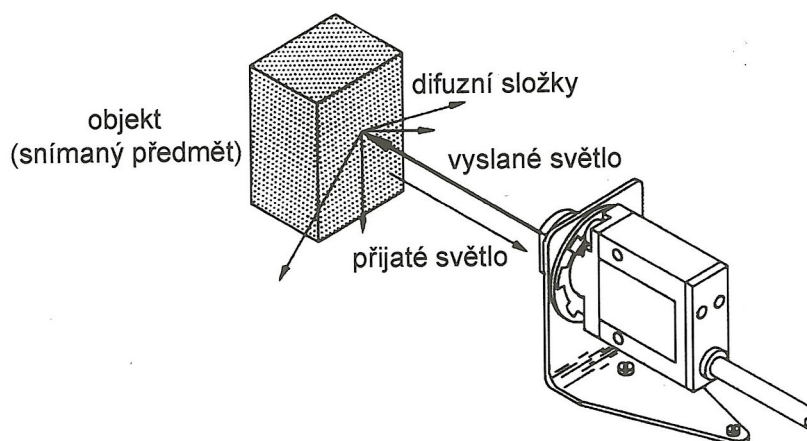
Existuje několik principů, díky kterým lze detekovat předmět nebo překážku mezi které zejména patří:

- Detekce přítomnosti předmětu pomocí odrazu IR záření.
- Určení vzdálenosti předmětu pomocí triangulace.
- Určení vzdálenosti předmětu pomocí měření doby letu paprsku (TOF).

### 1.2.1 Měření přítomnosti předmětu – reflexní senzory

Jedná se o konstrukčně nejjednodušší a v běžné praxi často používané senzory. Tyto snímače měří světelný výkon, a ten porovnávají s požadovanou přednastavenou hodnotou. Pro reflexní senzory v difuzním provedení je světlo vyzářené vysílačem difuzně odraženo (reflexe) od předmětu zpět k přijímači senzoru, viz obrázek 1.7. V tomto jednoduchém principu je detekční vzdálenost závislá na odrazivosti objektu a citlivosti senzoru. To znamená, že tmavý objekt má krátkou detekční vzdálenost a světlý naopak dlouhou.

Většina difuzních senzorů používá čočky pro kolimaci paprsku, aby se vrátilo co nejvíce světla. Tyto senzory mají problémy s lesklými povrchy předmětů, kdy je výrobcem garantována správná funkce pouze v případě, pokud je lesklý povrch snímaného předmětu přesně paralelní k rovině čočky. Vzhledem k tomu, že se vyhodnocení provádí porovnáním amplitudy přijatého signálu s referenční hodnotou senzoru, je detekční vzdálenost ovlivněna znečištěním optiky, plochou snímaného předmětu, případně změnou reflexních vlastností snímaného objektu. Přijatý optický výkon po difuzní reflexi je velmi malý, proto jsou i malé reálné detekční vzdálenosti, běžně do 500 mm. [12]



Obr. 1.8: Reflexní senzor založený na difuzi[12]

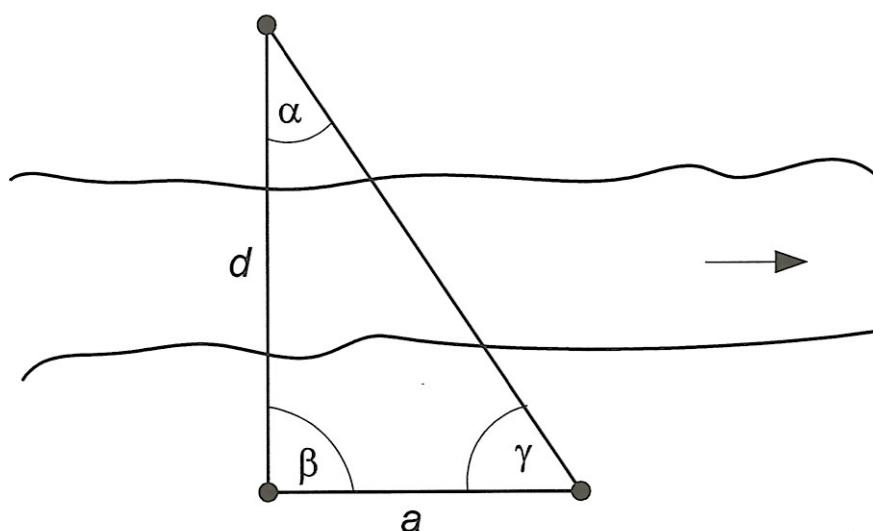
### 1.2.2 Určení vzdálenosti předmětu pomocí triangulace

Jedná se o typickou a nejstarší metodu, která se používá u optických senzorů. Z obrázku 1.9 lze určit vztah [12] pro výpočet vzdálenosti  $d$ , za podmínky, že je úhel  $\beta$  pravoúhlý:

$$d = a \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (1.1)$$

V elektronických senzorech s triangulací jsou využity systémy, které jsou schopné převést „venkovní“ triangulaci na optoelektronickou součástku. Dále hodnotu zpracuje buď mikropočítač, nebo u levnějších snímačů analogový obvod, který použije k výpočtu výrobcem pevně stanovenou rovnici.

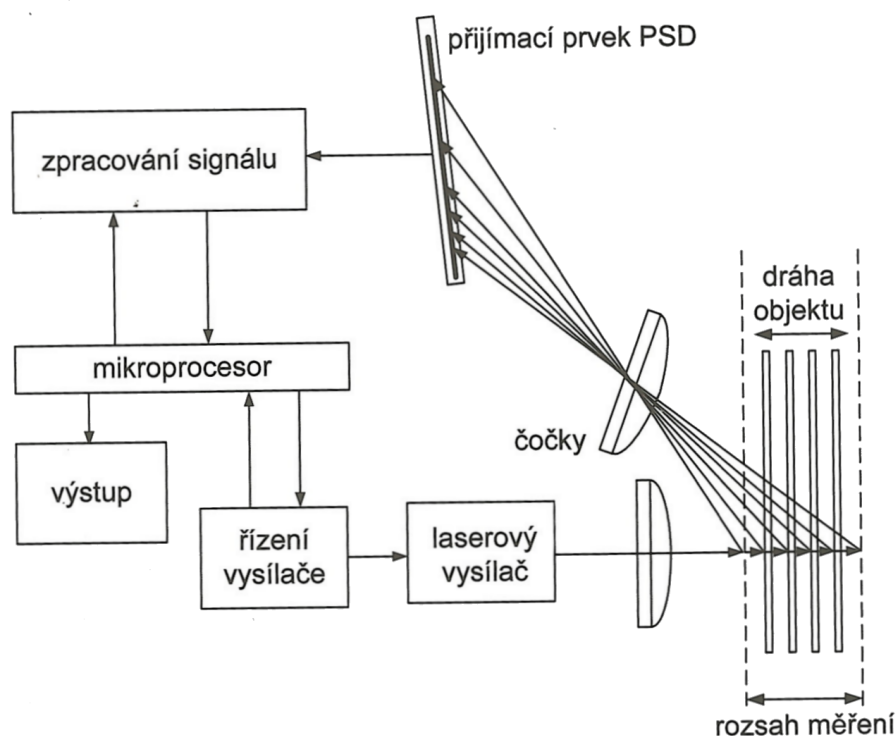
U senzorů využívajících tuto metodu, se užívá reflexe úzkého světelného paprsku od snímaného objektu. Zde mohou nastat dva případy. Buď odraz může být přesné zpětné vrácení paprsku nebo silně rozptýlený odraz do všech směrů, neboli difuze. První varianta se v praxi téměř nepoužívá, jelikož by detekovaný předmět musel být tvořen zrcadlem či materiálem s vysokou odrazivostí. Tento případ je však v průmyslové praxi zcela vyjíměčný.



Obr. 1.9: Triangulační metoda [12]

V průmyslovém prostředí se téměř vždy setkáme s difuzní reflexí světelného paprsku. To nám poskytuje výhodu, neboť měření je nezávislé na orientaci objektu vzhledem k vysílači IR záření. Detailní pohled je na obrázku 1.10. Použití běžných svítivých diod se používá v případech, kdy stačí malý světelný výkon, což má pozitiva zejména v nižší ceně. Nevýhodu použití LED lze spatřit v relativně velké emitující ploše čipu, která omezuje možnosti zaostření paprsku.

Dle obrázku 1.10 je jasné, že stačí z difuzně odražených paprsků získat jen jeden, který dostačuje k provedení měření. Jednoduchým řešením je využití clony s



Obr. 1.10: Optoelektronická triangulace [12]

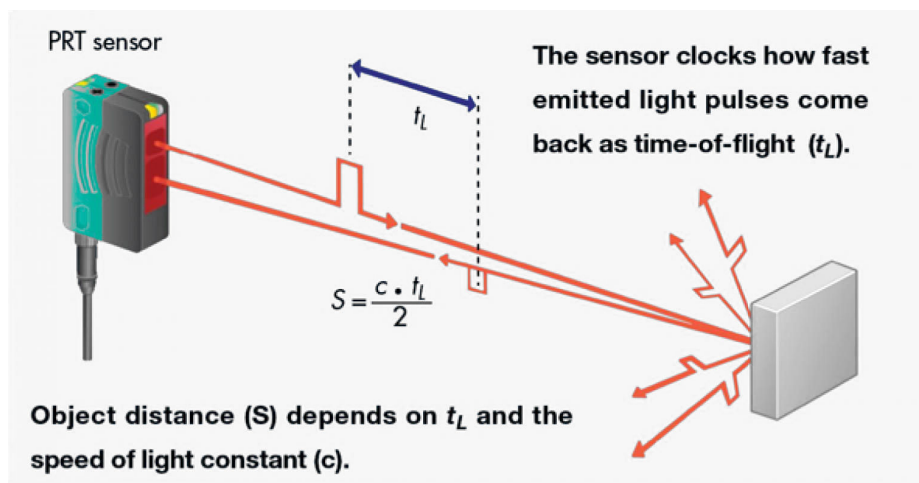
kruhovým otvorem nebo lze alternativně použít i čočku. Střední paprsek pak odpovídá měřicímu paprsku. Ostatní prošlé paprsky pouze zvětšují intenzitu dopadajícího světla na přijímací prvek.

K dosažení nezávislosti snímání na intenzitě světla u binárních senzorů, používající triangulační metodu, se používá diferenciální fotodioda. Tato metoda je použita obvykle u analogových senzorů pro měření vzdálenosti. Přijímač musí být schopen vyjádřit proměnnou polohu stopy paprsku. Jsou známy dvě optoelektronické komponenty, které se dají využít. Jako snímač polohy slouží CCD senzor v uspořádání do jednoho sloupce s mnoha řádky. Nevýhodou tohoto řešení je ovšem jeho velká finanční nákladnost. Proto jeho využití je zejména u velmi přesných měření velkých vzdáleností, kde je vysoká cena akceptovatelná.

Mnohem jednodušším způsobem, jak se dá zpracovat měřicí signál, je pomocí polohově citlivých polovodičových prvků PSD. Světelný paprsek, který dopadá na jeho plochu, vyvolá proud fotonů, který postupuje k oběma koncům polovodičové destičky. Při stejných zátěžích na obou koncích se vypočítá z poměru obou proudů poloha světelné stopy. Toto chování činí PSD ideálním prvkem pro lineární měření vzdálenosti optickou triangulací. [12]

### 1.2.3 Metoda TOF – doba letu paprsku

Další možností, jak mohou optické snímače pracovat, je měřicí metoda TOF – *Time of Flight*, neboli doba letu. V tomto přístupu se měří doba letu světla odraženého od překážky. Senzor vysílá pravidelně krátké pulzy směrem k měřenému předmětu, od kterého se odrazí zpět do přijímací čočky snímače. Následně se dopočítá časový rozdíl mezi vyslaným impulzem ze snímače a jeho opětovným přijetím. Tento údaj se ve finále přepočítá na vzdálenost [13]. Obrázek 1.11 slouží pro ilustraci této metody.



Obr. 1.11: Princip metody Time of Flight [13]

Vysílané vlny mohou být různého charakteru. Nejčastěji se používá metoda ultrazvuk, radiové milimetrové vlny (mmWave) nebo světelný paprsek (LiDAR). Ultrazvuk patří mezi jednoduché a levné řešení, ale musí se počítat s omezeným dosahem a omezeným prostorovým rozlišením objektů. Optické řešení TOF může znatelně odstranit nedostatky ultrazvuku v podobě většího dosahu a prostorového rozlišení, ale nelze je použít například v mlze nebo v zakouřeném prostředí. Princip založený na technologii mmWave patří mezi dražší a složitější, ovšem dosah je největší. Taktéž dokáží informovat o rychlosti a směru cílového objektu navzdory kouři, mlze nebo dešti. Typ technologie je nutné vybírat podle typu aplikace. Ultrazvukové senzory se převážně hodí pro detekci překážek v robotice nebo při parkování vozidla. Technologie mmWave poskytuje vozidlům schopnost snímání na velkou vzdálenost, která je potřebná pro detekci blížících se silničních rizik i při nepříznivých povětrnostních podmínkách. Proto se obě tyto technologie vyskytují například jako součást asistenčních systémů vozidel. [14]

### 1.2.4 Získání výstupu ze senzorů

Výstupy z IR senzorů jsou různé a téměř každý výrobce si definuje svůj vlastní výstup, proto je nutné si projít řádně popis a dokumentaci ke snímači.

V nejjednodušším a v praxi asi i nejčastějším výstupem je binární výstup. Tyto čidla fungují na principu překročení nastavení hranice a výstup senzoru pak nastaví do definované logické úrovně. Tyto senzory lze zejména nalézt u detekce překážky, nacházející se v definované vzdálenosti.

Pokud senzor vrací vzdálenost, tak je rozmanitost výstupů dána použitým a výrobcem podporovaným rozhraním. V této kategorii lze nalézt senzory, které vracejí hodnotu měřené vzdálenosti jako analogovou hodnotu napětí a výrobce pak dodává k produktu nejčastěji přepočítávací křivku ve formě rovnice, vyjadřující závislost napětí na změřené vzdálenosti nebo ve formě LUT (LookUp table) pro výrobcem předem definované vzdálenosti a napětí.

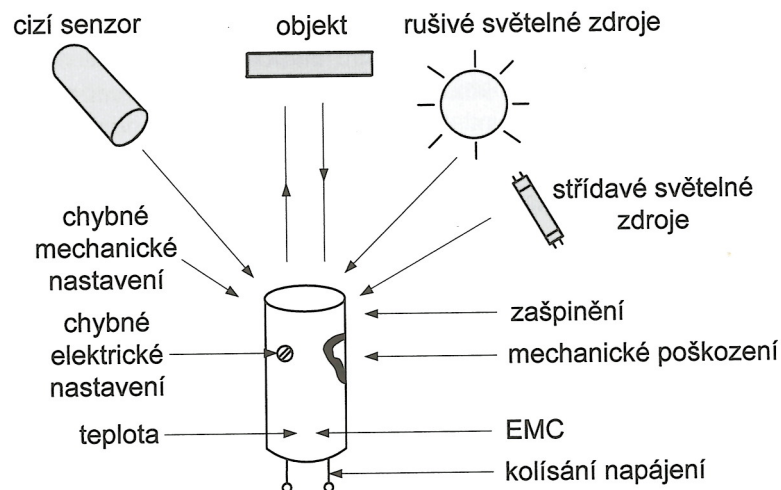
Posledním asi nejrozsáhlejším způsobem je využití komunikačního rozhraní ve formě sběrnice I<sup>2</sup>C, SPI, UART, RS232, RS485, CAN bus a samozřejmě existuje i spousta proprietárních datových připojení a protokolů. U tohoto typu výstupů se bez přístupu ke kvalitní a podrobné produktové dokumentaci již neobejdeme.

### 1.2.5 Vliv prostředí na činnost senzoru

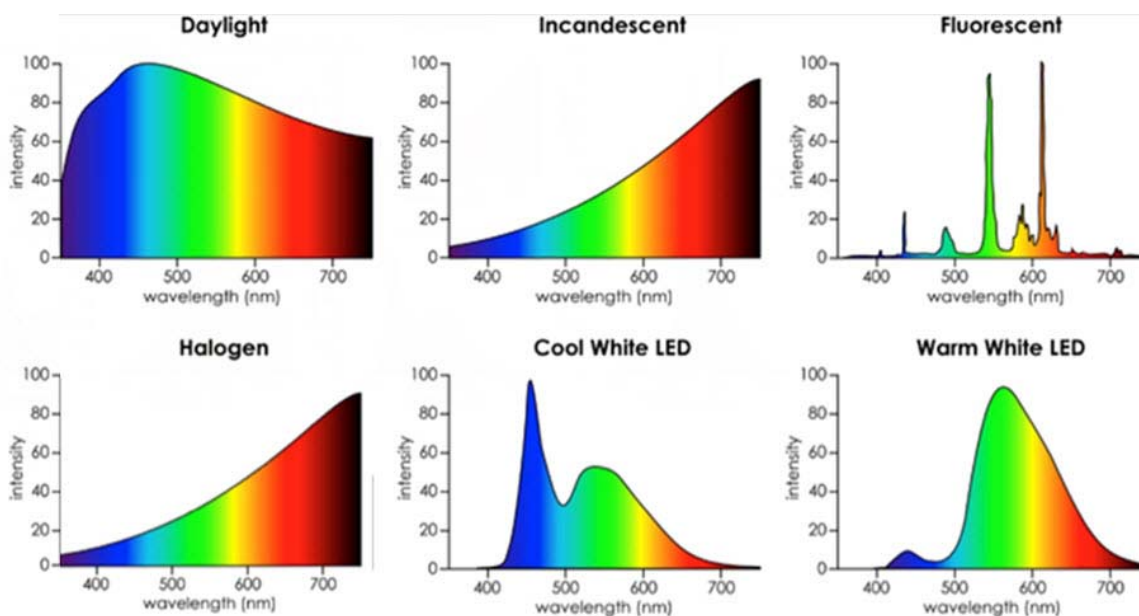
Pokud se zaměříme na prostředí, ve kterém probíhá vlastní robotická soutěž, můžeme se zde setkat s řadou rušících vlivů, se kterými je nutno počítat. Základní přehled těchto rušivých vlivů je na obrázku 1.12. Nejčastěji se musíme během zápasu potýkat s problémy, které se týkají rušení od senzoru oponenta, dále je to kolísání přirozeného osvětlení, konkrétně se jedná o působení slunečních paprsků na senzory robota. Kromě tohoto přirozeného osvětlení je zde problém v podobě umělých světelných zdrojů, které představují žárovky a zářivky v místnosti.

Kritickým problémem během zápasu, se kterým jsem se osobně setkal, je blesk z fotoaparátu nebo z telefonu. Tento světelný impuls často ochromí veškeré snímače na robota. Blesk působí nejen na vlnové délce IR snímače, ale i svou intenzitou, a tím dochází k neočekávaným reakcím robota.

Žárovky, zářivky, halogenové světla i denní světlo ve svém spektru obsahují vlnové délky patřící do oblasti používané IR senzory. Přehled spektra jednotlivých zdrojů světelného záření je na obrázku 1.13. Bohužel, tento faktor se nedá ovlivnit, každé prostředí soutěže je jiné, a proto je to i zároveň výzva, jak si poradit s těmito vlivy z okolí a jejich dopad na spolehlivost detekce minimalizovat.



Obr. 1.12: Rušivé vlivy ovlivňující snímání optosenzoru [12]

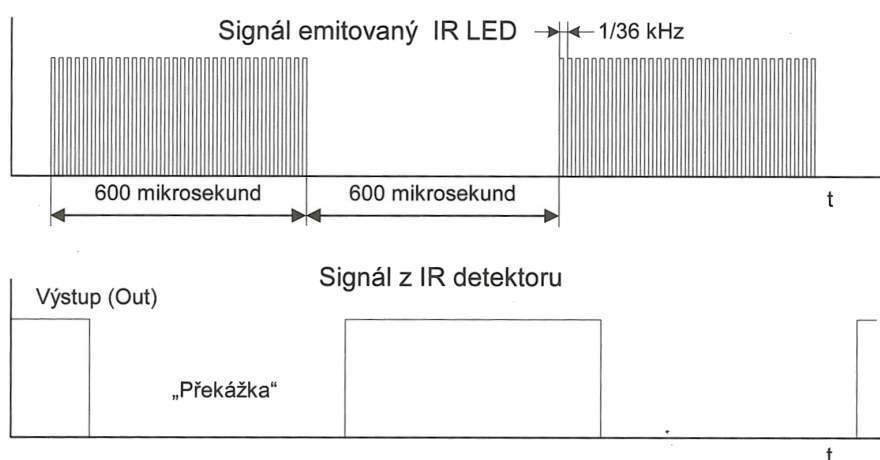


Obr. 1.13: Spektrum světla z různých zdrojů [15]

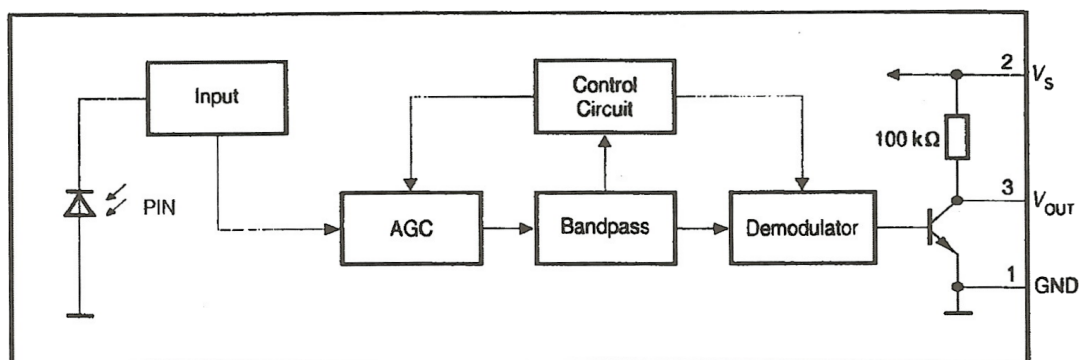
### 1.2.6 Optická modulace signálu

Ačkoliv se vzájemné rušení senzorů v průmyslové praxi často eliminuje jejich umístěním tak, aby k vzájemnému ovlivňování nedocházelo, přesto se výrobci snaží navrhovat senzory tak, aby byly na vnější rušení odolné. Jednou z nejčastěji používaných metod je metoda optické modulace signálu. Její princip lze popsat následujícím obrázkem 1.14.

Vysílací IR dioda je řízena proudovými impulzy pravoúhlého tvaru a to ve dvou frekvencích. První je vyšší frekvence nosná, obvyklé hodnoty jsou 36, 48, 52 kHz. Následně je tato nosná frekvence modulována nižším kmitočtem s On/Off modulací. Na obrázku 1.15 je blokové schéma přijímací strany senzoru. V přijímači dochází k jednoznačnému oddělení cizích stejnosměrných rušení od pulzního signálu, který pásmovým filtrem přijímače na rozdíl od stejnosměrné složky projde. Výhodou uvedeného řešení je to, že lze využít vyššího vysílacího výkonu. Tím se zvýší přijímaný výkon a odpovídajícím způsobem i rozdíl signálu a šumu. Dalším způsobem omezení rušení je použití tzv. vyklíčování poruch. Díky impulznímu on/off režimu jsou veškeré rušivé složky, které jsou vysílány v době vysílací pauzy vynechány. Tím je dosaženo i určité imunity vůči rušení od souběžně pracujících senzorů.[16]



Obr. 1.14: Ukázka modulace signálu[16]



Obr. 1.15: Příklad blokového schéma IR přijímače/demodulátoru [16]

## 1.3 Senzory používané pro soutěže minisumo

Konstrukce robota pro soutěž minisumo je zásadním způsobem ovlivněna kromě rozměrových a váhových limitů také použitými senzory oponenta. Je tedy nutné se před výběrem vlastního snímače zabývat i průzkumem, které senzory jsou k dispozici. Bohužel pro méně zkušeného konstruktéra není vůbec jednoduché, správně snímače zvolit. Existuje celá řada parametrů, nad kterými je třeba uvažovat a teprve po absolvování mnoha zápasů a návrhů různých konstrukcí si každý konstruktér najde ten svůj „správný“ senzor. Běžné vlastnosti senzorů jsou samozřejmě uváděny v produktových listech výrobce. V nich obvykle najdeme mimo jiné, jaký má daný senzor výstup, způsob napájení a jeho proudový odběr špičkový a trvalý, zda má fixní nastavenou detekční vzdálenost nebo jaký má měřicí rozsah a další. Informace o tom, jak senzor reaguje na okolní prostředí se většinou schovává pod univerzálním popisem o použití v normálním prostředí bez rušení.

V následujících podkapitolách jsou vybrány IR snímače, které jsou vhodnými kandidáty pro detekci překážky/opponenta. U každého snímače jsou dále popsány základní parametry od výrobce z datasheetu. Tyto senzory budou v závěru práce podrobeny testům odolnosti rušení v navrženém testovacím přípravku. Poslední snímač (ultrazvukový) byl zvolen pro demonstraci charakteristických vlastností snímače pracujícího v oblasti ultrazvuku.

### 1.3.1 Panasonic AMBA240906

Jedná se o průmyslový snímač od firmy Panasonic, řady AMBA využívaný pro detekci osob. Tyto řady senzorů dokáží poskytnout stabilní detekci i pro široký rozsah odrazivosti povrchů detekovaných objektů. Jsou schopné pracovat při odrazivosti signálu v rozsahu 18 až 90 procent. To jim zaručuje dobrý výkon i při detekci povrchu, který je špinavý. Další nesmírnou výhodou, že pracují s jedním napájecím napětím a vyrábí se v několika rozměrech a orientacích vhodných pro použití právě v robotech minisumo, kde jsou tyto snímače velmi využívány, byť jejich cena nepatří mezi nejmenší, lze je zakoupit za cenu 1200 Kč za kus.

Uvedený IR snímač vysílá na vlnové délce 850 nm a používá napájecí stejnosměrné napětí 4,5–5,5 V. Detekční vzdálenost je 600 mm (rozsah maxima 570 mm až 630 mm). Měřicí tolerance je 5 procent. Průměrný měřený proud snímačem se pohybuje okolo 5,5 mA. Vlastní měřicí cyklus (nejkratší doba spolehlivé detekce překážky) je 8 ms. Šířka infračerveného paprsku je zhruba 10 cm na jednu stranu, při maximu (60 cm) je šířka okolo 20 cm na každou stranu od osy středu senzoru. Detailní pohled na snímač je na obrázku 1.16





Obr. 1.16: Senzor překážky Panasonic AMBA 240906[17]

### 1.3.2 DFRobot infračervený senzor SEN0164

Tento OEM IR snímač 940 nm od prodejce DFRobot se vyznačuje vysokou citlivostí fotodetektoru, který dokáže detekovat překážky ve vzdálenosti v rozsahu 3 cm do 50 cm. Vyzařované infračervené světlo se vysílá proti měřenému objektu, kde se odrazí a vrací se zpět. Fototranzistor zaznamená difuzně odražený signál a následně je aktivován výstup senzoru. Senzor má v sobě zabudovaný i potenciometr, který slouží pro nastavení hraniční vzdálenosti. Z toho vyplývá, že si lze snímač upravit dle požadavků v rámci pracovní detekční vzdálenosti pro detekovaný povrch. Napájecí napětí je 5 V, spotřeba obvodu je uváděna jako menší než 25 mA, doba odezvy je kratší než 2 ms, rozsah úhlu detekce výrobce uvádí menší 15° od středu senzoru. Cena senzoru je přibližně 300 Kč. Pohled na snímač je na obrázku 1.17



Obr. 1.17: Senzor překážky DFRobot SEN0164[18]

### 1.3.3 Infračervený senzor překážky E18-D80NK

Senzor neznámého čínského výrobce, jedná se o levný, velmi lehce dostupný a v mnoha aplikacích používaný snímač, který je jednoduchý pro instalaci. Prodejce uvádí, že snímač má v jisté míře ošetřeno rušení proti viditelnému světlu pomocí filtru, pro světlo ze žárovky, či slunečního záření. Senzor disponuje nastavitelným měřicím rozsahem pomocí potenciometru. Rozměry senzoru nejsou v originálním pouzdře vhodné pro zabudování do robota, odstraněním plastového obalu lze docílit podstatně kompaktnějšího tvaru senzoru. Výstup senzoru je digitální a odpovídá přítomnosti překážky před senzorem. Napájecí napětí je 5 V, nastavitelná vzdálenost detekce je v rozmezí 3–80 cm, spotřeba obvodu je okolo 45 mA. IR vysílač senzoru pracuje s modulovaným signálem o frekvenci 38 kHz a vlnovou délkou 940 nm. Doba odezvy se pohybuje okolo 2 ms. Cena snímače se pohybuje kolem 180 Kč. Snímač je na obrázku 1.18



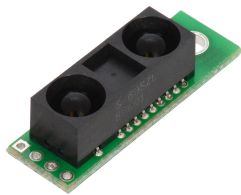
Obr. 1.18: Senzor překážky E18-D80NK[19]

### 1.3.4 Sharp GP2Y0A60SZ0F

Zástupce snímače vzdálenosti od firmy Sharp je infračervený senzor vzdálenosti velmi kompaktních rozměrů. Skládá se ze tří částí a to PSD, IR–LED vysílač pracující s modulovaným signálem a vlnovou délkou 870 nm. Poslední část tvoří obvod sloužící pro zpracování signálu a převod vzdálenosti na napětí. Výrobce uvádí, že potlačil vlivy prostředí, jako například různou odrazivost měřeného objektu či teplotu prostředí. Měření vzdálenosti je prováděnou metodou triangulace. Senzor poskytuje analogový výstup napětí, odpovídající naměřené vzdálenosti. Jeho použití je například v robotice, bankomatech, počítačích, LCD monitorech a v řadě dalších aplikacích. Obvyklá cena se pohybuje kolem 250 Kč.

Parametry snímače jsou následující: Měřicí vzdálenost je od 10 do 150 cm, analogový výstup (napětí úměrné vzdálenosti), napájecí napětí 5 V a proudový odběr

okolo 40 mA, doba jednoho cyklu měření odpovídá 21,5 ms. Výstupní napětí se pohybuje okolo 0,7–3,7 V. Pohled na snímač nám ukazuje obrázek 1.19

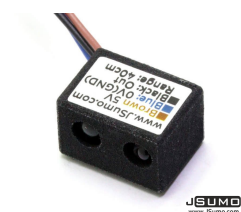


Obr. 1.19: Senzor vzdálenosti Sharp GP2Y0A60SZ0FK[20]

### 1.3.5 JSUMO JS40F

Jedná se produkt turecké společnosti JSUMO, která se zaměřuje na robotické soutěže, kam dodává vyráběné díly. Na svém internetovém obchodě poskytuje veškeré příslušenství k robotům, od motorů, snímačů až po samotné celé konstrukce.

Tento snímač je specializovaný pro minisumo soutěž nebo pro malé robotické projekty. Detekuje objekt do cca 40 cm. Senzor má digitální výstup, který je v logické úrovni H, pokud je před senzorem v jeho detekčním rozsahu překážka. IR senzor vysílá modulovaný signál frekvencí 48 kHz s vlnovou délkou 940 nm. Doba odezvy snímače je okolo 1 ms. Pracuje s napájecím napětí 5 V, přičemž jeho průměrný odběr je okolo 15 mA. Snímač váží pouhé 4 gramy a je velice malých rozměrů (17×11×12 mm) s cenou kolem 350 Kč. Viz obrázek 1.20



Obr. 1.20: Senzor překážky JSUMO JS40F[21]

### 1.3.6 Digitální senzor překážky Pololu

Společnost Pololu patří mezi firmy, které jsou známy výrobou hobby produktů pro robotiku. Do jejího portfolia patří řada senzorů pro detekci překážek. Vybraný senzor je založen na obvodu Vishay TSSP77038, který představuje ultra-miniaturní SMD přijímač IR signálu s digitálním výstupem a využívá se pro detektory přiblížení. Zpracovává modulovaný IR signál na frekvenci 38 kHz a vlnové délce 940 nm.

Přijímač je vybaven obvody pro potlačení rušivého ambientního osvětlení a dle katalogového listu výrobce, zvládne i rušení silným IR signálem. Spotřeba snímače se pohybuje okolo 16 mA, při napájecím napětí 5 V. Rozsah detekce IR signálu na viditelnou vzdálenost činí dle datasheetu přibližně 60 cm, doba odezvy je asi 1 ms. Cena je cca 150 Kč. Obrázek 1.21 znázorňuje detailní pohled na provedení snímače.

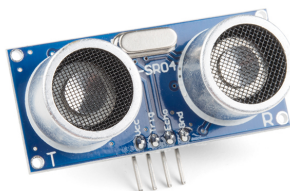


Obr. 1.21: Snímač od firmy Pololu[22]

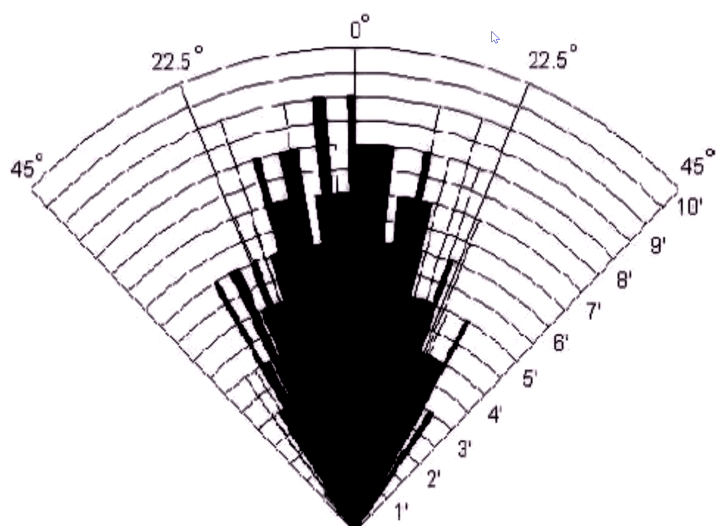
### 1.3.7 Ultrazvukový snímač HC-SR04

Snímač pracuje v rozsahu od 2 do 400 cm, přesnost měření může být až 3 mm. Modul obsahuje ultrazvukový vysílač, přijímač a obvody pro vyhodnocení a digitální výstup. Modul funguje tak, že se na vstup TRIG přivede vysoká logická úroveň na minimálně 10  $\mu$ s. Modul automaticky vyšle 8 ultrazvukových pulzů o frekvenci 40 kHz a následně čeká, zda se nějaký pulz vrátí zpět. Pokud se tak stane, je aktivován digitální výstup snímače. Aplikace využívající tento senzor pak může snadno na základě doby od návratu pulzu a známé rychlosti zvuku vypočítat vzdálenost od předmětu nacházejícího se před senzorem. Napájecí napětí je 5 V a průměrný odběr činí 15 mA, měřicí úhel je v rozsahu 15–35° od osy senzoru. Detail konstrukce je na obrázku 1.22.

Obrázek 1.23 ukazuje detekční charakteristiku ultrazvukového senzoru, z níž plyne, že pro detekci v rozsahu cca 90 cm, což odpovídá na tomto obrázku hranici  $3^{ft}$ , je zorný úhel senzoru přibližně 60 stupňů. Pro účely detekce malého robota na ringu jej činí nepoužitelným. Dalším problémem je rychlost zvuku, kdy čas potřebný pro přijetí odraženého signálu od překážky ve vzdálenosti 60 cm činí v ideálním případě přibližně 17,6 ms.



Obr. 1.22: Ultrazvukový snímač vzdálenosti HC-SR04[23]



Obr. 1.23: Detekční charakteristika senzoru HC-SR04[24]

## 2 Návrh testbedu

V úvodu této kapitoly budou probrány a definovány základní požadavky na navrhované zařízení. Dále bude navrženo základní blokové schéma testovacího přípravku a jednotlivé dílčí části, které budou podrobně popsány.

### 2.1 Požadavky na zařízení

Aby bylo možné navrhnout automatizovaný testbed pro měření požadovaných vlastností IR senzorů, je třeba si nejprve definovat požadavky, které chceme, aby dané zařízení splňovalo a sloužilo tak svému účelu. V prvním kroku si tedy položíme otázku co je naším cílem a co požadujeme po testbedu.

Účelem testbedu je otestování chování IR senzoru tak, abychom získali dostatek podkladů pro rozhodnutí k výběru toho nejvhodnějšího možného kandidáta pro použití jako detektoru oponenta pro roboty kategorie minisumo. V předchozích kapitolách byly již popsány některé problémy, které byly na soutěžních robotech pozorovány. Jednalo se zejména o stav, kdy robot detekoval oponenta v místě, kde nebyl a stavy, kdy se robot v soutěžním ringu choval v průběhu soutěže neočekávaně v závislosti na vnějších faktorech, jako je osvětlení a blesky od fotoaparátů.

Pokud si tedy položíme otázku, co chceme měřit, odpověď lze shrnout jednou větou. Navrhované zařízení by mělo umožnit změřit, jakým způsobem je ovlivněna schopnost detekce IR senzoru vnějšími vlivy. V kapitole 1.2.5 je shrnuto, které vlivy to jsou. V našem případě bude testovací přípravek zaměřen na tyto faktory:

1. Působení cizího IR senzoru.
2. Rušivé ambientní osvětlení.
3. Působení umělých světelných zdrojů (50 Hz).
4. Ověření rozsahu detekce překážky senzorem.

Další nedílnou součástí požadavků na zařízení je jeho flexibilita a uživatelské ovládání. Zařízení tedy musí být dostatečně univerzální. To znamená, poradit si s výstupním signálem z měřeného snímače a napájením alespoň pro hodnoty 3,3 a 5 V. Mělo by být taktéž možné snadno zapojit testovaný senzor do přípravku. Z uživatelského pohledu by bylo vhodné, aby se dalo zařízení snadno ovládat pomocí GUI a bylo schopno plánovat provedení testů, ukládání a vizualizaci výsledků.

## 2.2 Metoda způsobu řešení uživatelských požadavků

V této kapitole je shrnuto navržené řešení uživatelských požadavků.

### 2.2.1 Působení cizího senzoru

Pro simulaci senzorů oponenta bude použito dostupných IR LED s vlnovou délkou 850 a 940 nm. Dvojice IR LED bude rozmístěna v poloze  $\pm 45$  stupňů vůči měřenému snímači a další dvojice bude přímo součástí testovacího objektu umístěného na pohyblivém rameni, které je natočeno přímo proti měřenému snímači. Dále se bude zkoumat, jaký má vliv modulovaný signál na měřený snímač. Vysílací IR LED budou napájeny dvěma různými hodnotami proudu a vysílaný signál bude modulován frekvencí 38, 48, 56 kHz. Tyto frekvence a vlnové délky odpovídají nejčastěji používaným hodnotám v senzorech detekce překážky.

### 2.2.2 Rušivé ambientní osvětlení

Musíme testovat snímač na různé vlivy rušení, které se týkají osvětlení v místnosti. Test bude zahrnovat simulaci osvětlení pomocí LED pásků, konkrétně budeme simulovat konstantní osvětlení o barvě světla 3000, 4000 a 6000 K, alternativně budou použity i testy pro jednotlivé barevné složky R, G, B dvou různých intenzit. Dalším testem bude simulace blesku za pomoci intenzivních krátkých záblesků v barvě světla 6000 K.

### 2.2.3 Působení umělých světelných zdrojů

V tomto testu využijeme LED pásků, ale jejich napájení bude prováděno modulovaným signálem. Tento průběh bude simulován za pomoci DA převodníku na řídicím mikrokontroléru Arduino Due. Simulace bude pokrývat světelné záření odpovídající halogenové žárovce a zářivkovému osvětlení při napájení ze střídavého zdroje.

### 2.2.4 Ověření rozsahu detekce překážky senzorem

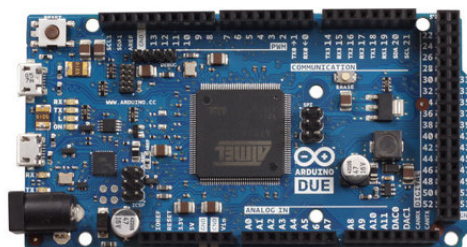
Ověření rozsahu detekce senzoru bude provedeno za pomoci řízeného posuvu umělé překážky v 2D souřadném systému. Přípravek bude zaznamenávat odezvu senzoru pro různé konfigurace vzdálenosti a úhlu detekované překážky. Pro zjištění šířky vysílaného IR paprsku bude systém disponovat IR kamerou a projekčním plátnem s možností získání obrázku ozářené plochy v pevné vzdálenosti od vysílacího prvku senzoru.

## 2.3 Řídicí jednotky použité v práci

Pro realizaci této práce lze s výhodou využít cenově dostupných řídicích jednotek. Řídicí jednotka Arduino Due bude využita pro ovládání hardwaru a jednodeskový počítač Raspberry Pi 4 slouží jako řídicí počítač celého testbedu. V následujících podkapitolách budou popsány základní vlastnosti těchto jednotek.

### 2.3.1 Arduino Due

Arduino Due [25] je protypová deska, obsahující mikrokontroler Atmel SAM3X8E ARM Cortex M3. Tato Arduino deska patří mezi první, která je založena na 32 bit jádru ARM a na rozdíl od většiny ostatních desek Arduino pracuje s napětím 3,3 V. Doporučené napájecí napětí je v rozmezí 7–12 V. Deska má 54 digitálních vstupních/výstupních pinů. Jako výstupy PWM lze použít 12 digitálních pinů. Dále deska obsahuje 12 analogových vstupů, čtyři sériové porty, frekvence procesoru je 84 MHz, k dispozici jsou i dva analogové výstupní DAC porty. Paměť flash dostupná pro uživatelské aplikace je 512 kB. Detailní pohled na desku Arduino Due je na obrázku 2.1.

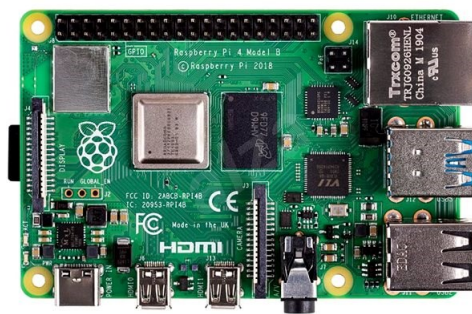


Obr. 2.1: Arduino Due[26]

### 2.3.2 Raspberry Pi 4 Model B

Raspberry Pi [27] je jeden z nejoblíbenějších jednodeskových počítačů na světě. Verze 4B je dosud nejvýkonnější model a jedná se o první plnohodnotnou náhradu osobního počítače. Operační paměť si lze zvolit ve velikostech 1/2/4 GB RAM. Základní řídicí jednotkou je 1,5 GHz čtyřjádrový procesor ARM Cortex-A72. Významného výkonu je zajištěno pomocí technologie 28 nm. Grafika VideoCore byla povýšena na verzi VI, která přináší 4K video a režim dvou monitorů. Napájecí konektor je oproti starším verzím zaměněn za USB-C. Dále tato deska disponuje čtyřmi USB konektory, přičemž dva z nich jsou verze 3.0 a ethernet je gigabitový. Detail desky Raspberry Pi 4 je na obrázku 2.2.





Obr. 2.2: Raspberry Pi 4 Model B[28]

## 2.4 Realizace jednotlivých částí testbedu

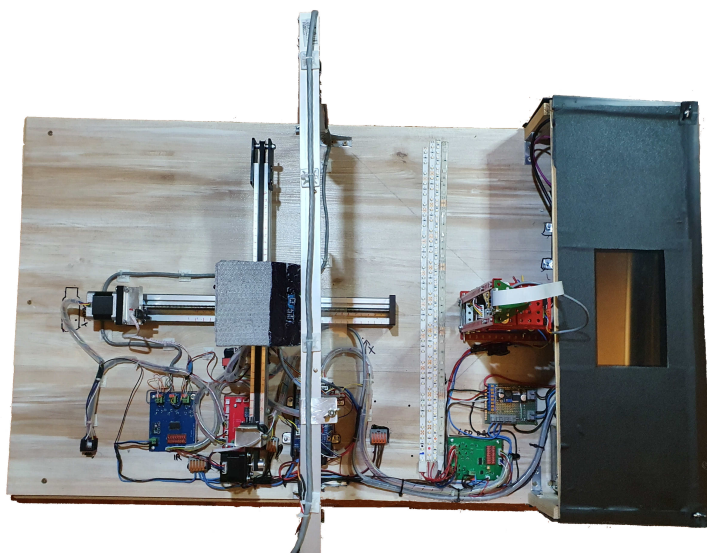
Tato kapitola se zabývá návrhem jednotlivých funkčních částí testbedu. První část se věnuje mechanické konstrukci, další části se zabývají blokovým schématem testbedu a jednotlivých částí zařízení. U každé části je nejprve funkce popsána blokově, a poté výsledným řešením. K blokovým schématům byly navrženy jednotlivé obvody, které se před vlastní výrobou plošných spojů řádně otestovaly na propojovacím poli. Teprve poté, co se ověřila jejich správná funkčnost a chování, byly tyto obvody předány do výroby. Výroba desek plošných spojů byla provedena čínskou firmou z důvodu jejich velmi přijatelné cenové politiky, byť za cenu delší doby dodání. Detailní pohled na vyrobené a osazené plošné spoje jsou na obrázcích v následujících kapitolách. Každá barva plošného spoje představuje jednu samostatnou část odpovídající navrhované funkcionalitě.

### 2.4.1 Mechanická konstrukce testbedu

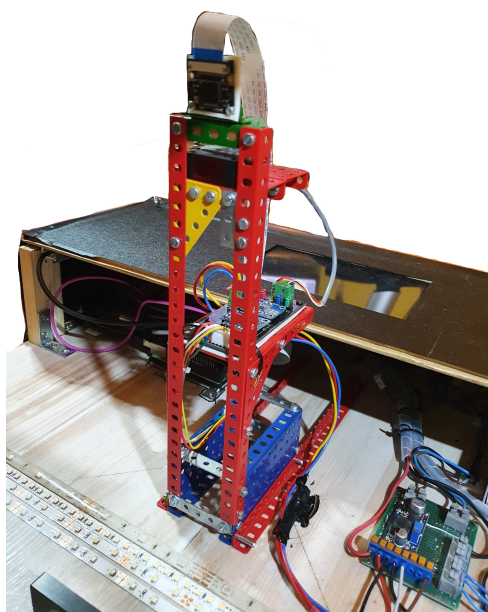
Výsledná mechanická část celého zařízení je na obrázku 2.3. Základní konstrukce zařízení je připevněna na podkladu z plovoucí podlahy a dřevěných hranolů. Půdorysný rozměr činí  $540 \times 1010$  mm. Pravá část je tvořena řídicí jednotkou Raspberry Pi 4 a podružnou jednotkou Arduino Due. Tyto jednotky jsou schovány pod černým krytem. Zde se nachází také rozvodná deska, která propojuje ostatní periférie jako LCD displej [29], Arduino Due, kameru a testovaný senzor. Elektronika zahrnuje napájecí zdroj pro všechny části testovacího zařízení.

V červeném stojanu, který je sestaven ze stavebnice Merkur, je místo pro připevnění testovaného snímače a Raspberry Pi kamery. Níže je pak patro, kde je umístěna deska pro připojení čidla. Detailní pohled je na obrázku 2.4. Podrobný popis této desky je popsán v následující kapitole.

Před touto konstrukcí jsou umístěny čtyři LED pásy, každý o jiné barvě světla a jeden RGB.



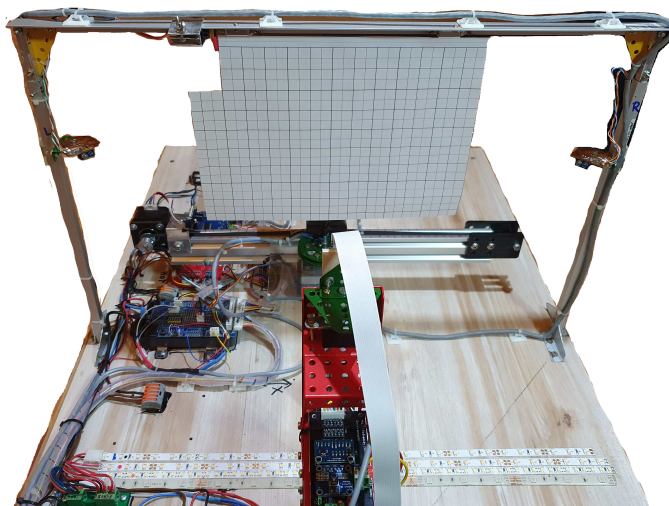
Obr. 2.3: Mechanická konstrukce zařízení



Obr. 2.4: Stojan pro upevnění kamery a testovaného senzoru

Uprostřed zařízení se nachází upevňovací rám, na kterém jsou připevněny IR LED s vlnovou délkou 850 nm a 940 nm. Tyto IR LED jsou umístěny pod úhlem  $45^\circ$  směrem k testovanému snímači. Dále na tomto rámu je umístěno plátno, které je spuštěno za pomoci servomotoru [30]. Plátno umožňuje pořídit snímek z kamery, a tím zjistit, jakou plochu ozařuje testovaný snímač. Detail plátna je na obrázku 2.5.

Nejdůležitější částí testbedu je posuvný systém v osách XY. Umožňuje změřit detekci objektu. Pohyb osy zajišťují krokové motory *NEMA 17* [31] s 200 kroky na otáčku. V ose X je použito ozubeného řemene k posunu objektu a celá osa je dále posouvána v souřadnici Y za pomoci závitové tyče. Motory jsou ovládány pomocí driverů *A4988* [32]. Součástí posouvání je i podstavec, na kterém je připevněn cvičný oponent. Rozsah pohybu os X–Y je  $450 \times 450$  mm.



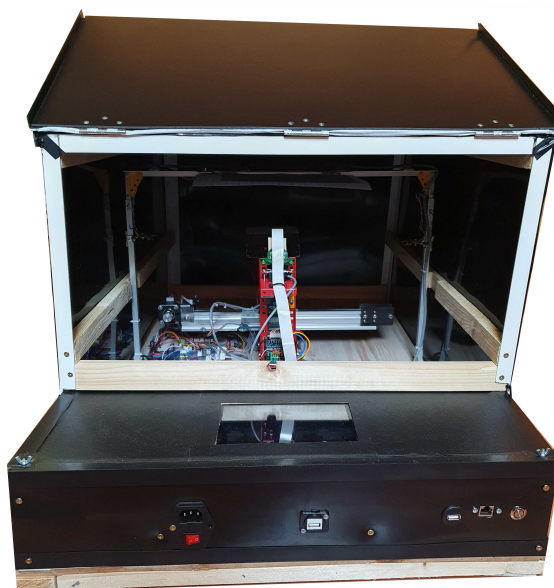
Obr. 2.5: Promítací plátno

Obrázek 2.6 ukazuje přední panel, ve kterém se nachází konektory připojené k řídicí jednotce a vyvedené mimo ni. Jedná se o konektor USB 2.0 a síťovou zásuvku LAN (v pravé části). Dále se vedle těchto konektorů nachází tlačítko pro reset zařízení. V levé části je pak konektor pro připojení síťového napájení. Pod tímto konektorem je hlavní vypínač pro vypnutí či zapnutí celého zařízení.

Pro dosažení co nejlepších výsledků měření a eliminaci vnějších vlivů je celé měřicí zařízení odizolováno od průniku vnějšího světla pomocí neprůhledného krytu. Pro snadnou manipulaci a případné servisní zásahy je kryt volně položen na základní desku zařízení. Dále pro snadnou instalaci testovaného snímače a rychlou kontrolu zařízení je přední část otvíratelná. Určitou konstrukční výzvou je právě zajištění zamezení průniku světla, ale v současném stavu se toto povedlo eliminovat. Rozměry světlo izolující skříně jsou  $600 \times 1000 \times 500$  mm.

## 2.4.2 Blokové schéma testbedu

Základní blokové schéma celého zařízení je na obrázku 2.7. Řídicí jednotkou je zvoleno Raspberry Pi 4, které bude mít za úkol komunikovat s periferiemi, zejména



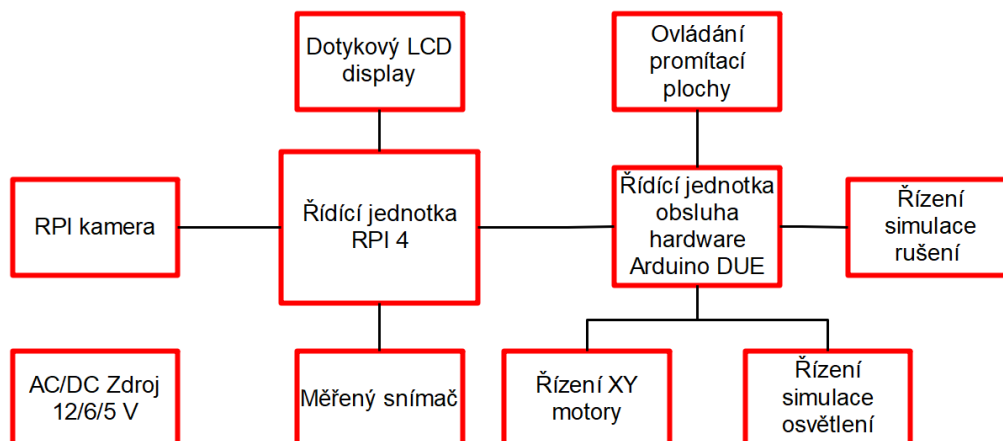
Obr. 2.6: Pohled na přední část testbedu

s kamerou a LCD dotykovým displejem. Dále tato jednotka bude provádět vzájemnou komunikaci s řídicí jednotkou pro obsluhu hardware. Z důvodů relativně malého počtu GPIO výstupů u hlavní řídicí jednotky je pro obsluhu hardware testbedu zvoleno využití další řídicí jednotky.

IR kamera je připojena k řídicí jednotce *RPi* a slouží k pořizování obrázků osvětlené plochy IR senzorem po vysunutí promítací plochy. Ovládání této plochy je zajištěno pomocí malého servomotoru. Promítací plocha je tvořena bílým papírem, na kterém je vyznačen rastr o mřížce  $20 \times 20$  mm. Spuštění papíru je provedeno ve vzdálenosti 200 mm před testovacím snímačem a kamerou. Pomocí zachyceného snímku jsme schopni vyhodnotit, jaký je tvar ozářené plochy senzorem.

Dotykový 7" LCD displej o rozlišení  $1024 \times 600$  bodů je primárně určen pro obsluhu celého zařízení. Umožňuje ovládat základní nastavení, správu testů, jejich ukládání a vizualizaci. Jedná se o běžné připojení displeje pomocí HDMI s dotykovým ovládáním, tím pádem lze ovládat celý operační systém *RPi* a využívat tak všech možností řídicí jednotky.

Řídicí jednotka pro hardware – Arduino DUE, má na starost řízení jednotlivých simulací. Nedílnou součástí je řízení motorů pro posuv modelu překážky v osách X a Y a řízení IR diod k měření testovaného snímače. Řízení simulace osvětlení spočívá v přepínání druhů osvětlení. K dispozici má několik druhů LED pásků s různou barvou světla včetně RGB. Dále jednotka obsluhuje modul simulace vlivu IR záření na senzor.



Obr. 2.7: Celkové blokové schéma zařízení

### 2.4.3 Blokové schéma části měřeného snímače

Tato část blokového schématu (obrázek 2.8) je zaměřena na námi měřený snímač. S řídicí jednotkou je spojen *Level shifter* (převodník napětových úrovní) [33]. Ten nám zajišťuje převod napětí z *RPi* na vhodnou napětovou úroveň pro výstupy a ovládání testovaného snímače. Napětí bude obvykle odpovídat hodnotě 3,3 nebo 5 V. ADC (analogově–digitální) převodník umožňuje pracovat s analogovými výstupními signály z testovaného snímače.

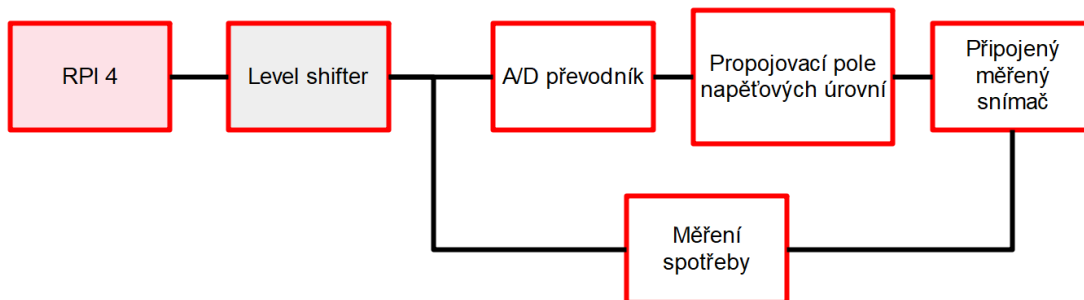
Propojovací pole napětových úrovní umožňuje jednoduchým způsobem nakonfigurovat za pomoci propojek správné napájecí napětí pro snímač, připojení analogového či digitálního signálu na převodník napětových úrovní a připojení pomocných signálů. Je tvořen propojovací soustavou, kde se propojí jednotlivé části dle data-sheetu měřeného snímače.

Doplňkovou funkcí je měření spotřeby testovaného snímače. Znalost proudového odběru je důležitá, jelikož jsme při konstrukci robota omezeni použitým napájecím zdrojem a obvykle je na robota větší množství aktivních snímačů současně.

Výsledná část pro zapojení měřeného snímače k testbedu je na obrázku 2.9. Osazený plošný spoj disponuje na levé straně konektorem, se kterým se připojujeme k Raspberry Pi 4 B.

Level shifter nám zajistí převod 3,3 V z Raspberry na hodnoty potřebné k napájení měřeného snímače. Tato hodnota je obvykle 3,3 V nebo 5 V. Jelikož Raspberry nedisponuje ADC převodníkem, je nutné jej implementovat samostatně. Konkrétně je použit modul *ADS1115* [34], který je 16–bitový. Převodník disponuje čtyřmi analogovými vstupy. Komunikace je po sběrnici I<sup>2</sup>C a napájecí napětí je 5 V.



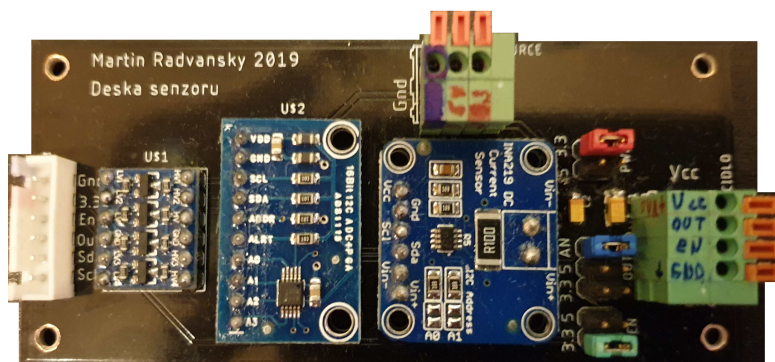


Obr. 2.8: Blokové schéma části měřeného snímače

Obvod *INA219* [35] slouží pro měření proudu, díky kterému jsme schopni měřit spotřebu testovaného snímače. Na horní straně desky senzoru je vyvedeno napájení pro testovaný snímač, obvod pro měření proudu a *Level Shifter*.

Aby byla deska univerzální a byla schopna pracovat se senzory, které mají různé specifikace týkající se napájecího napětí a výstupů, je k dispozici propojovací pole na pravé straně plošného spoje. Pomocí propojek lze nastavit napájecí napětí 3,3 V nebo 5 V, výstup snímače digitální, analogový. U některých senzorů je možné měřit spotřebu v aktivním a neaktivním stavu za využití řídicího signálu *Enable*.

Zbývající wago svorka slouží pro připojení testovaného snímače. Schéma desky senzoru je v příloze A.



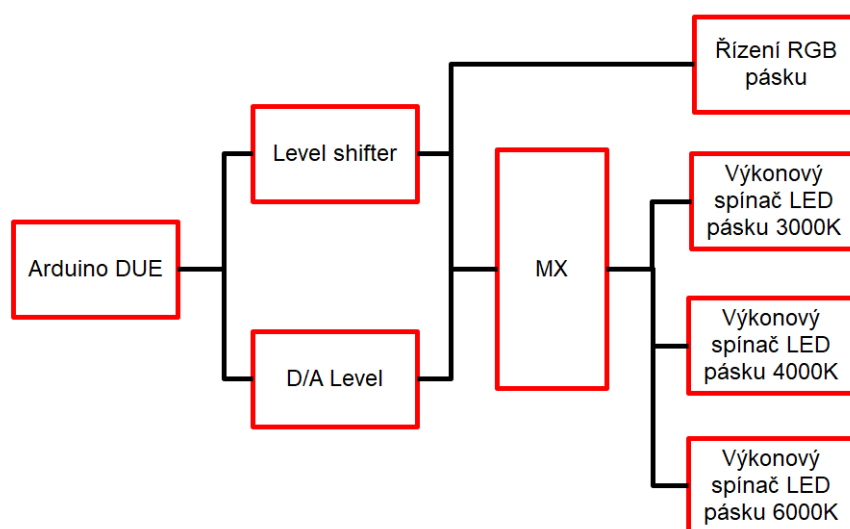
Obr. 2.9: Osazený plošný spoj pro zapojení měřeného snímače

## 2.4.4 Blokové schéma řízení simulace osvětlení

Blokové schéma je na obrázku 2.10 ukazuje hlavní bloky použité pro řízení simulace osvětlení. Řídící signály přicházející z jednotky Arduino Due prochází přes převodník napětových úrovní a za pomoci demultiplexoru jsou tyto signály připojovány na výkonové spínače jednotlivých LED pásků.

DAC převodník slouží k simulaci průběhů zářivkového a halogenového osvětlení, a tedy k řízení změny intenzity osvětlení na výkonových spínačích.

Demultiplexor nám slouží jako jednoduchý přepínač mezi jednotlivými druhy osvětlení. Každý z použitých LED pásků, kromě RGB pásku, který je řízen samostatně, má dva různé výkonové stupně. Jeden je zvolen s větší intenzitou osvětlení a druhý pak s přibližně poloviční intenzitou osvětlení.

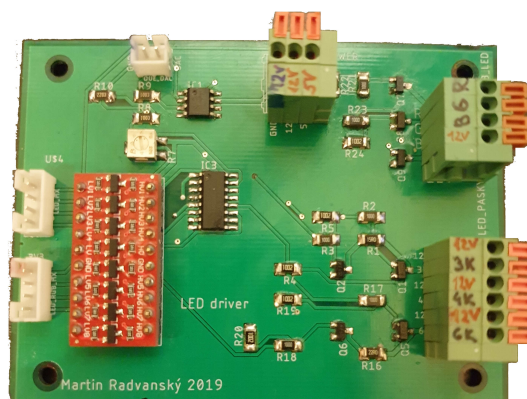


Obr. 2.10: Blokové schéma řízení simulace osvětlení

Osazený plošný spoj pro ovládání simulace osvětlení je na obrázku 2.11. Levá část obsahující dva bílé konektory slouží pro připojení Arduino Due. Horní konektor je taktéž připojen k Arduino Due, konkrétně k digital–analog převodníku, který se s výhodou využívá přímo z desky Arduino Due.

Největší součástku tvoří *Level Shifter*, nad ním je obvod pro převod napětového rozsahu DAC (0,4–2,4 V) do napětové úrovně (0–5 V) vhodné pro ovládání tranzistorových spínačů LED pásků.

Pravá část plošného spoje tvoří spínače pro jednotlivé LED pásky. Wago svorky slouží pro snadné připojení všech LED pásků. Výběr LED pásku je zajištěn za pomoci *demultiplexoru* (IC3). Schéma zapojení je v příloze B.

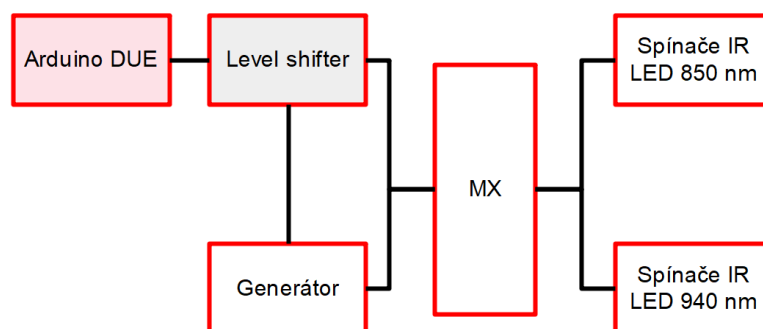


Obr. 2.11: Osazený plošný spoj s funkcí řízení simulace osvětlení

### 2.4.5 Blokové schéma řízení simulace rušení

Další podčástí celkového blokového schématu je blok řízení simulace rušení, viz. obrázek 2.12.

Tento subsystém je řízen z Arduino Due a převodník napěťových úrovní přizpůsobuje další připojené obvody. Modul generátoru, který je připojen pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C slouží pro vygenerování frekvencí použitých pro modulaci IR vysílacích LED diod a přes *demultiplexor* jsou pak tyto modulační frekvence přiváděny na jejich výkonové spínací prvky.

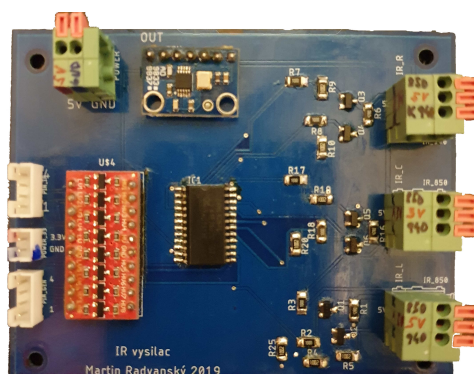


Obr. 2.12: Blokové schéma řízení simulace rušení

Výsledný navržený a osazený obvod je na obrázku 2.13. Levá část, obsahující bílé konektory slouží pro připojení pinů od Arduino Due. Levá vrchní wago svorka slouží pro napájení ostatních periférií tohoto plošného spoje, tedy *Level Shifter* (vlevo), demultiplexor (uprostřed) a obvod *AD9833* [36] nahoře. Tento obvod má funkci programovatelného generátoru signálu, díky kterému lze poslat na vybrané IR LED modulovaný signál. Pravou část plošného spoje tvoří tranzistory ve spínacím režimu.



IR LED lze provozovat ve dvou různých výkonech. K dispozici jsou IR LED s vlnovou délkou 850 nm a 940 nm. Právě tyto svorky slouží pro připojení těchto IR LED. Schéma zapojení viz. příloha C

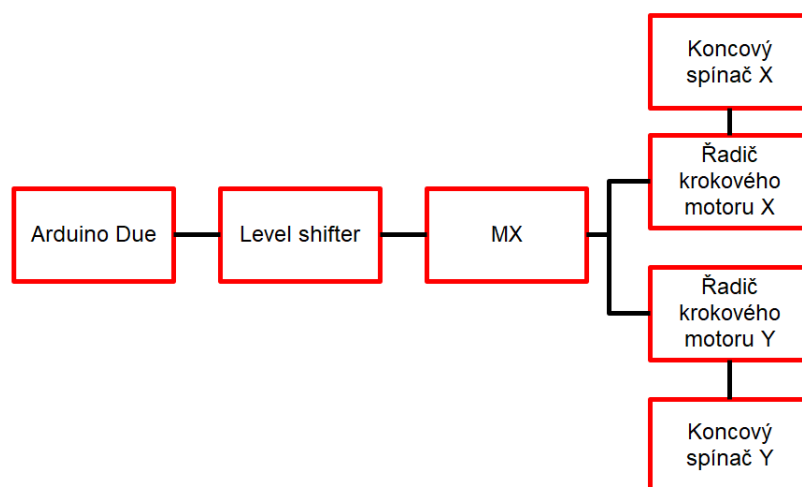


Obr. 2.13: Osazený plošný spoj pro řízení simulace rušení

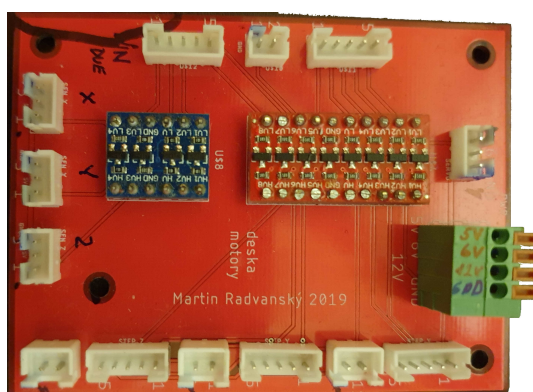
## 2.4.6 Blokové schéma části řízení motorů

Poslední částí je řízení krokových motorů posunu testovací překážky v osách X a Y. Schéma je na obrázku 2.14. Úkolem této části je pohyb překážky vůči stacionárnímu měřenému snímači. Po nezbytném převodu napěťových úrovní jsou řídicí signály přivedeny přes *demultiplexor* na *řadiče krokových motorů*. Každá osa je vybavena koncovým spínačem pro definování koncové polohy v odpovídajícím směru. Použité připojení motorů přes *demultiplexor* umožňuje pohyb testovací překážky vždy pouze v jednom směru, tato vlastnost systému nám, ale nijak nevadí.

Výsledný návrh je na obrázku 2.15. Osazený plošný spoj slouží pro propojení Arduino Due s veškerými motory a koncovými spínači v testbedu. Uprostřed plošného spoje se nacházejí dva *Level Shifter*. Schéma zapojení desky plošných spojů je v příloze D.



Obr. 2.14: Blokové schéma řízení motorů



Obr. 2.15: Osazený plošný spoj pro řízení motorů

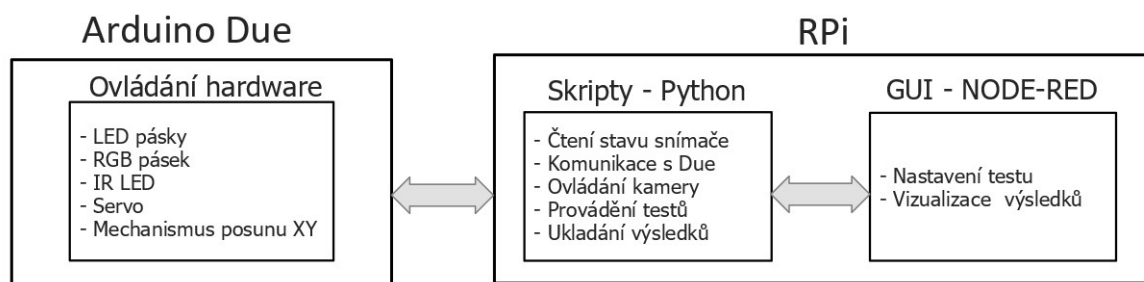
### 3 Ovládací software

Bez ovládacího software by celý testovací přípravek byl jen kus elektroniky. Teprve se softwarem se promění v užitečnou pomůcku.

Ovládací software lze rozdělit na dvě hlavní části. První část je spojena s jednotkou Arduino Due. Ta má na starosti ovládání veškerých periférií, mezi které patří obsluha krokových motorů v osách X a Y, spuštění plátna za pomoci servomotoru, ovládání LED pásek a infračervených LED diod. K IR rušení patří i vytváření rušivého signálu z generátoru *AD9833*.

Druhá část je tvořena řídicí jednotkou Raspberry Pi 4. Ta komunikuje s jednotkou Arduino Due za pomoci sběrnice UART. K Raspberry Pi je také připojena deska plošného spoje, která má na starost testovací senzor. Dále k této jednotce je připojena Raspberry Pi kamera pro pořízení snímků, které budou ukazovat IR vyzařování daného testovaného senzoru.

Zařízení se bude ovládat za pomoci dotykového LCD displeje, umístěném přímo na testbedu. Dále bude možné provádět nastavení zařízení vzdáleně za aplikací GUI. Řídicí program v Raspberry Pi je napsán v jazyce Python. Data jsou ukládána lokálně na SD kartě zařízení a budou přístupná po síti ke stažení a případnému dalšímu zpracování. Jednotlivé části softwaru testbedu jsou zobrazeny ve schématu na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Schéma rozmístění částí software

#### 3.1 Ovládání hardwaru pomocí Arduino Due

K ovládání veškerého hardware zařízení bylo užito Arduina Due, které disponuje dostatečným výkonem. Arduino Due má na starost zejména ovládání simulaci osvětlení, simulaci rušení pomocí IR LED, spuštění plátna pro Raspberry Pi kameru pomocí servomotoru, komunikaci s generátorem *AD9833* pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C, ovládání posunu krokových motorů. Pro pohyb jednotlivých krokových motorů je využito standardních příkazů *STEP* a *DIR*.

Díky svým technickým parametrům, Arduino Due má k dispozici celkem osm časovačů. Knihovna *Servo* využívá časovač dva pro pohyb servomotoru, realizující funkci zvedání a spouštění plátna. Další dva časovače jsou využity pro funkce testbedu. První je určen pro generování sinusového rušivého signálu, který je poté přiveden na jednotlivé LED pásy. Druhý časovač je pak použit pro zapnutí funkce blesku na LED pásek.

Hlavní program po startu provede nastavení a inicializaci jednotlivých vstupů a výstupů Arduina Due. Po tomto nastavení hlavní část programu čeká na příchozí příkaz od řídicí jednotky Raspberry Pi 4, a to pomocí sériové komunikace s rychlostí 115 200 kbit. Je využito sériového kanálu jedna, k dispozici Arduino Due má čtyři sériové kanály. Pro získání ladících informací je využito *USB Native* portu Arduina Due.

### 3.1.1 Vývojový diagram softwaru Arduina Due

Firmware se skládá ze tří základních částí zobrazených na obrázku 3.2.

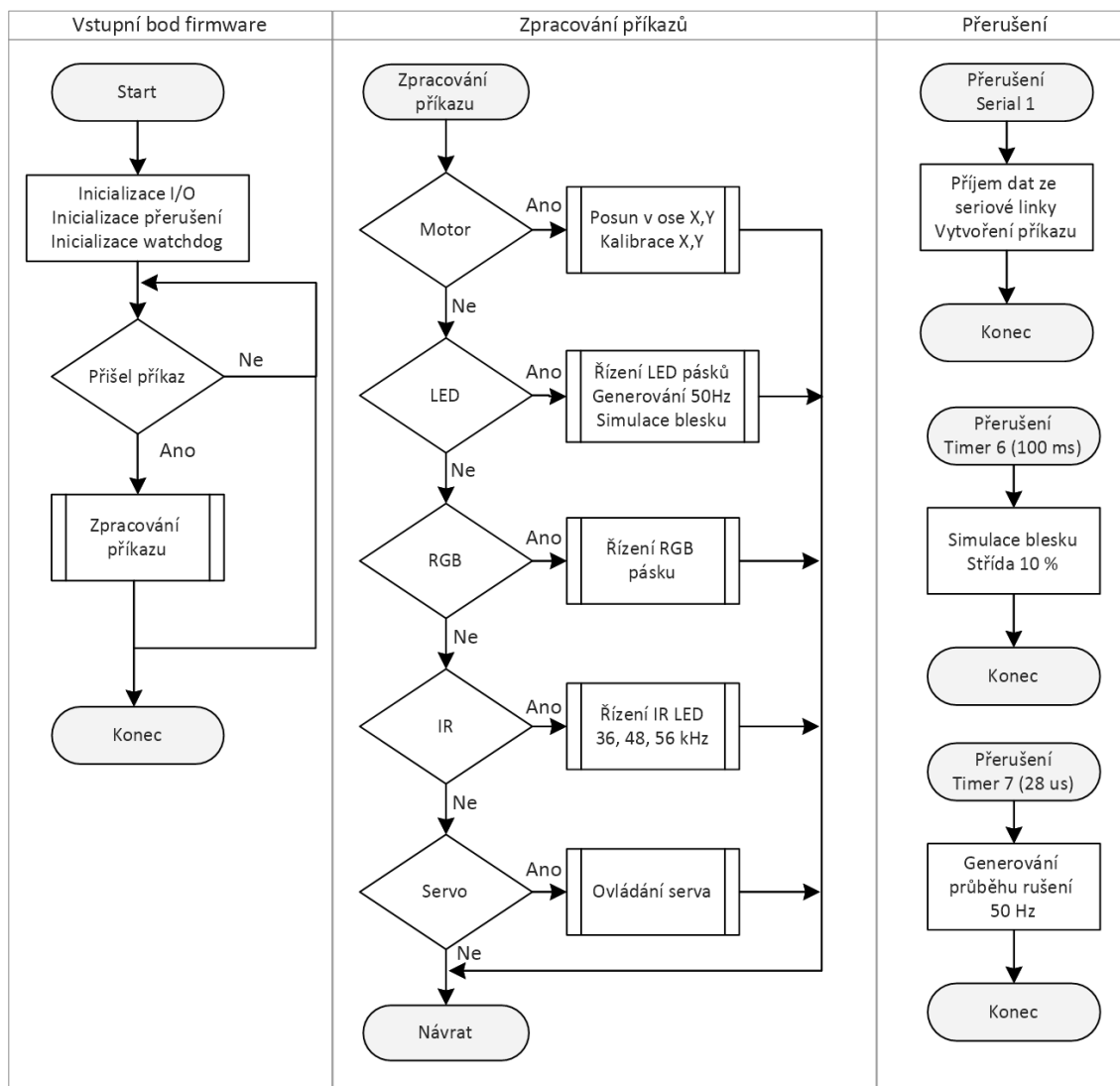
Jedná se o tyto části:

- vstupní bod firmwaru Arduino Due;
- funkce pro zpracování příkazů;
- obsluha přerušení.

#### Vstupní bod firmwaru Arduino Due

Po spuštění Arduina Due je spuštěna standartní funkce *setup*, kde jsou nastavovány periferie připojené k řídicí desce. Sériová linka jedna je inicializována na komunikační rychlost 115 200 kbit. Dále jsou nastaveny vektory přerušení pro práci s periferiemi a komunikační sběrnice I<sup>2</sup>C. V rámci zajištění ochrany před uváznutím programu je využito funkce *watchdog* s nastavením časového intervalu pěti sekund.

Po inicializaci je spuštěna hlavní smyčka programu (funkce *loop*), ve které se testuje, zda přišel příkaz s parametry po sériové lince. V případě, že je příkaz připraven ke zpracování, je spuštěna funkce zpracování příkazu.



Obr. 3.2: Vývojový diagram softwaru pro Arduino Due

### Zpracování příkazů z nadřazeného systému

Zpracování příkazů a jejich parametrů je provedeno pomocí implementace rozhodovací smyčky. Každý jednotlivý příkaz řídí jednu připojenou periférii (Motor, LED pásky, RGB LED pásek, IR LED diody a servomotor).

Pro každou jednotlivou periférii dochází k přechodu mezi jednotlivými funkcemi, například pro pásky LED dochází ke změnám stavů – permanentní svícení, různé teploty světla, intenzita osvětlení vyšší, či nižší, zapnutí generování simulace rušení 50 Hz, spuštění a zastavení blesku a další.

## Funkce obsluhy přerušení

Z důvodu optimálního využití Arduina Due se používá přerušení pro takové činnosti, které vyžadují časově závislé činnosti, je využito vnitřních časovačů mikrokontroléru.

Data ze sériové linky jsou přijímána pomocí obsluhy přerušení. Tímto způsobem je sestaven příkaz, který se má vykonat a jeho parametry. Po sestavení tohoto příkazu je nastaven příznak, na který reaguje hlavní smyčka.

Pro generování blesku je využito časovače, který v intervalu 100 ms vyvolává přerušení, na jehož základě je potom LED pásek rozsvícen po dobu 100 ms a dalších 900 ms je zhasnut.

Abychom nasimulovali změny intenzity osvětlení, které jsou způsobeny zářivkovými a halogenovými svítidly, je využíváno DAC převodníku, který generuje průběh změny intenzity LED pásku odpovídající uvedeným zdrojům. Data pro generování jeho průběhů jsou posílána v každém vyvolání přerušení.

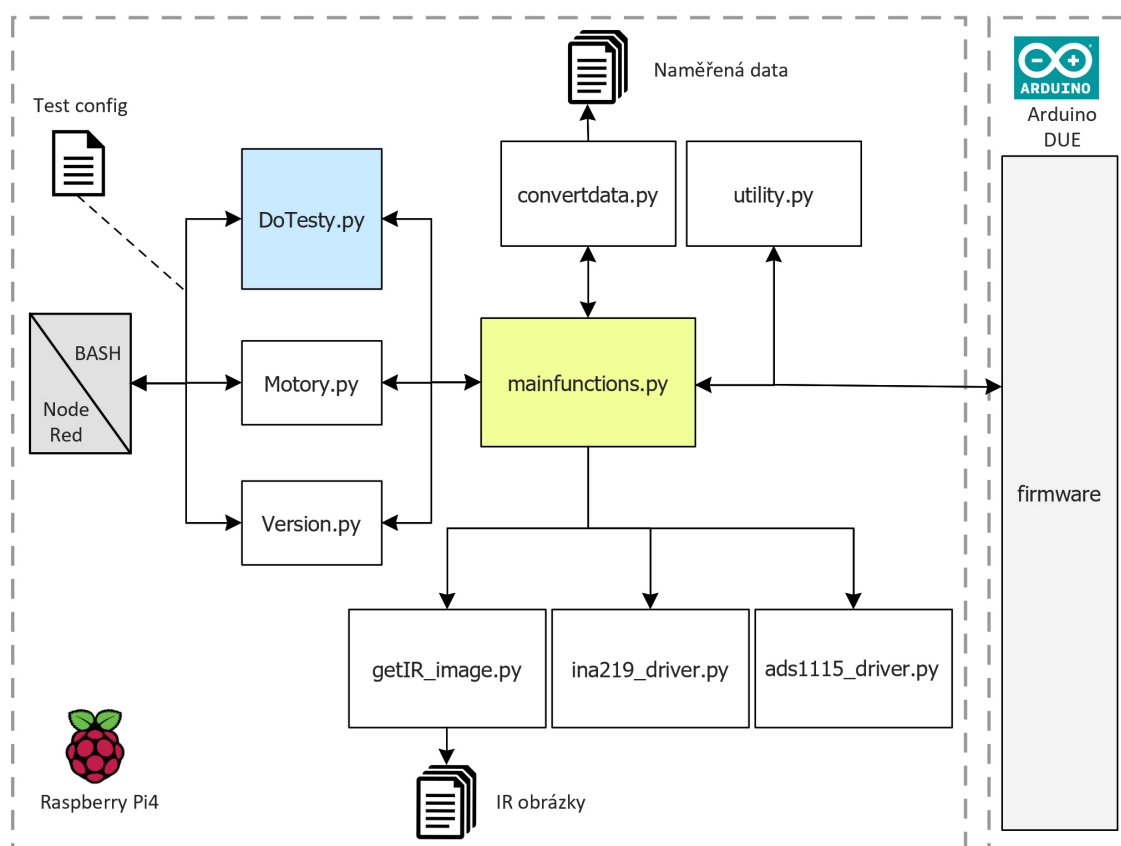
## 3.2 Skripty pro Raspberry Pi

Firmware obsažený v Arduino Due slouží pouze k ovládání hardwaru. Aby bylo možné provést vlastní měření, je třeba užít nadřazené jednotky Raspberry Pi, která bude ovládat hardware přes Arduino Due a vytvoří posloupnosti příkazů, které následně vytvoří komplexní měření. K dosažení tohoto cíle byly vytvořeny skripty v jazyku v Python 3, které jsou prováděny na řídicí jednotce Raspberry Pi.

Na následujícím obrázku 3.3, je zobrazeno blokové schéma propojení jednotlivých skriptů. Skripty jsou napsány takovým způsobem, aby je bylo možné spouštět jak z příkazové řádky se správně nastavenými parametry, tak z webové aplikace v prostředí Node-RED. Hlavním skriptem, který provádí testy na základě konfiguračního souboru je skript *DoTesty.py*.

### 3.2.1 Hlavní skript testbedu

Činnost hlavního skriptu je ovlivněna vstupními parametry. Mezi tyto parametry patří konfigurační soubor, který obsahuje požadavky pro provedení testu, cestu obrázku pro uložení a zobrazení na webové stránce, dále složku a název souboru, kam se mají ukládat výsledky testu.



Obr. 3.3: Schéma propojení skriptů testbedu

### Konfigurační soubor testu

Konfigurační soubor testu obsahuje informace o tom, které testy a části hardwaru se mají podílet na vlastním měření. Při zvolení všech dostupných možností se test jednoho snímače skládá z 66 cyklů. Jeden cyklus, při kterém dochází k měření charakteristiky senzoru trvá přibližně 6 minut. Z toho plyne, že při výběru všech dostupných možností trvá provedení kompletního testu jednoho čidla přibližně 7 hodin, což činí provedení testu velmi časově náročným. Je tedy vhodné nastavit parametry tak, aby splňovaly nezbytně nutné minimum, které po testu chceme.

Konfigurační soubor je textový soubor obsahující středníkem oddělené hodnoty, kde na jednom řádku je název parametru a hodnota nastavovaného parametru. Tento konfigurační soubor lze vytvořit buď ručně v editoru operačního systému, případně je automaticky vygenerován při spuštění testu z webového prostředí.

### Činnost hlavního skriptu DoTesty.py

Hlavní skript si nejprve spočítá počet kroků, které budou v testu prováděny. Tuto informaci potřebuje k tomu, aby mohl vypisovat do konzole průběh dokončených

testů. Při zpracování testu se vytvoří soubor s logem (viz příloha E), který poskytuje informace o provedeném testu a době jeho trvání. Jako první z testů se vždy provádí test charakteristiky snímače bez použití vnějších vlivů. Výsledkem testu je vytvoření matice, která obsahuje informaci o tom, zda na dané poloze byl vozík detekován, či nikoliv. Tato matice může obsahovat binární hodnoty v případě digitálního výstupu senzoru nebo hodnoty změřeného napětí, pokud je použito senzoru s analogovým výstupem. Tato hlavní charakteristika senzoru je uložena ve zvolené složce s podnázvem *data.csv*.

Každý z prováděných testů vytváří svůj vlastní soubor s výsledky, které jsou ukládány do vybrané složky. Aby bylo možné data vizualizovat a vytvořit detekční charakteristiku senzoru, je využito skriptu *converdata.py*. Z dat je vytvořen graf detekční charakteristiky v polárních souřadnicích, a tento graf je uložen do výstupu jako html soubor. Tento soubor lze prohlížet jakýmkoliv webovým prohlížečem, přičemž lze interaktivně zjišťovat naměřené hodnoty z grafu.

### 3.2.2 Skript pro získání IR snímku

Kromě běžné detekční charakteristiky senzoru je testbed vybaven i funkcí umožňující vizualizovat a manuálně i změřit IR vyzařovací charakteristiku měřeného senzoru na promítacím plátně, umístěném na pevně definované vzdálenosti 200 mm od senzoru. Tato vizualizace nám umožní získat představu o tom, jakou plochu senzor ozáří pro účely detekce. Promítací plátno obsahuje mřížku o rozměru 20×20 mm. S využitím kamery bez IR filtru, která je připojena k Raspberry Pi můžeme získat snímek IR vyzařování.

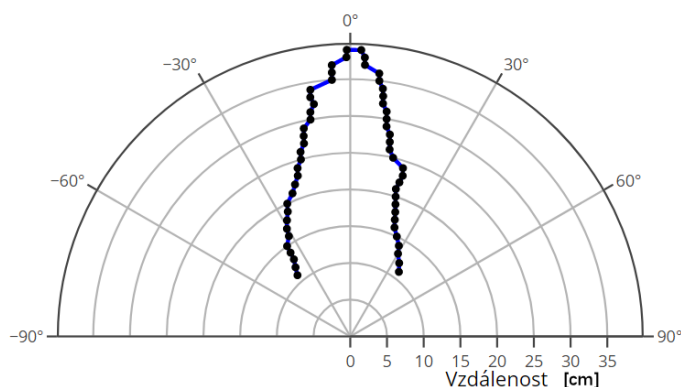
Skript *getIr\_image.py* ke své činnosti využívá knihovny *Picamera* pro obsluhu kamery a pro výsledné prahování snímku, za účelem zlepšení čitelnosti, je využito knihovny *OpenCV* [37]. Ve zvolené složce jsou uloženy tři snímky, a to originál, snímek převedený do odstínů šedé a výsledný černobílý prahovaný snímek. Snímky lze dále využít pro zobrazení na webové stránce obslužné aplikace.

### 3.2.3 Skript pro konverzi dat

Z měření průběhu testu si skript nejprve načte *csv* soubor, ve kterém jsou uloženy detekce vozíku. Každá hodnota na řádce nese informaci o tom, zda byl vozík na dané pozici detekován, či nikoliv. Stav detekce je zaznamenán v případě digitálního senzoru binárními hodnotami, v případě analogového snímače se jedná o hodnoty výstupního napětí senzoru. Jeden řádek výsledné matice je získán jako zprůměrované hodnoty měření provedených ve směru zleva–doprava a opačném. Tímto způsobem je možné zachytit i informaci o hysterezi detekce snímače, která může být způsobena konstrukčním řešením snímače.



Pro zobrazení charakteristiky detekce je třeba matici převést do podoby, kdy bude obsahovat pro každý řádek pouze krajní detekční body. Z takto upravené matice lze získat polární souřadnice, které jsou nutné pro zobrazení detekční charakteristiky senzoru. Pomocí knihovny *Plotly* je vytvořen v cílové složce testu soubor *charakteristka.html* (viz obrázek 3.4), který obsahuje interaktivní html verzi polárního grafu.



Obr. 3.4: Vykreslená charakteristika senzoru

### 3.2.4 Pomocné skripty

Kromě výše uvedených hlavních skriptů testbedu je k jejich činnosti potřeba celá řada pomocných skriptů.

#### **Motory.py**

Skript slouží pro samostané ovládání motorů. Pomocí jeho funkcí lze interaktivně ovládat motory testbedu z webové stránky pomocí tlačítek.

#### **Version.py**

Skript poskytuje informaci o aktuální verzi firmwaru jednotky Arduino Due.

#### **ina219\_driver.py a ads1115\_driver.py**

Pro zajištění komunikace s obvodem *INA219*, který je zapojen pro měření proudu testovaného senzoru slouží knihovna *ina219\_driver*. Při použití senzoru s analogovým výstupem je potřeba tyto hodnoty převést do digitální podoby, což je funkce tohoto skriptu, který umožňuje komunikaci s *ADC* převodníkem.

## **mainfunctions.py**

Obsahuje hlavní funkce, které jsou využívány hlavním testem. Zjednodušuje tak předávání nezbytných parametrů pro provedení jednotlivých testů.

## **utility.py**

Tento soubor obsahuje funkce, které slouží pro nastavování hardwaru, jako je sériová komunikace, ukládání a načítání souborů ve formátu *CSV* a další pomocné funkce.

## **3.3 Ovládací program testbedu**

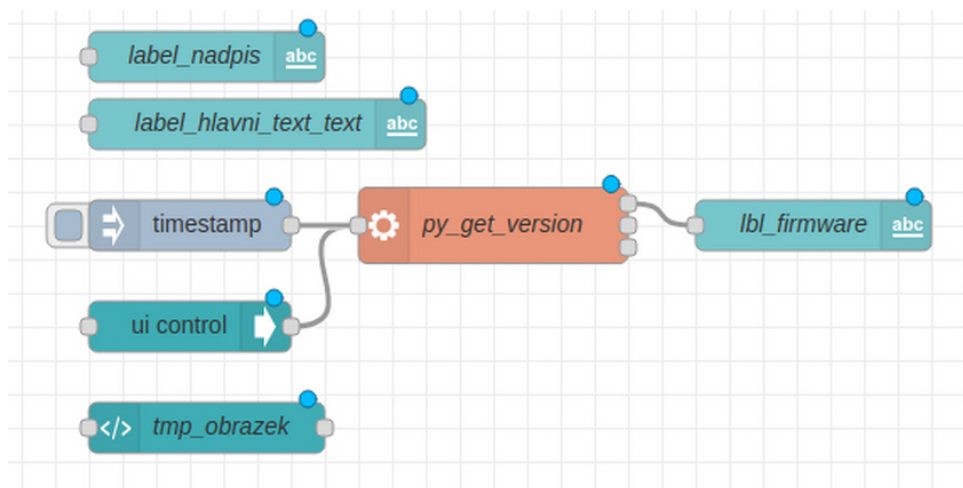
Po připojení napájení k testbedu a spuštění řídicí jednotky Raspberry Pi je zobrazena webová aplikace na dotykovém displeji testbedu. Webová aplikace je vytvořena v prostředí Node-RED. Program lze rozčlenit na tři samostatné části. Jedná se o nastavení konfigurace testu, zobrazení výsledků měření a část o aktuální verzi programu v Arduino Due.

### **3.3.1 Node-RED – Uživatelské rozhraní**

Node-RED [38] je uživatelsky přívětivý open-source programovací nástroj, který využívá pro programování aplikací tzv. flow-based přístup. Chování aplikace je popsáno za pomoci série uzlů, neboli nodes, kdy každý tento uzel má svou předdefinovanou činnost, na základě které zpracovává příchozí data a následně je odesílá do dalšího uzlu v pořadí. Díky tomuto principu vzniká datový tok (flow) mezi jednotlivými uzly.

V případě, že se Node-RED využívá jako základ rychlého prototypování vizuální části aplikace, je možné si vystačit pouze s vizuálním návrhářem. V případě složitějších požadavků, jako například v chování nebo v barevnosti aplikace, je třeba využít úpravu pomocí *JavaScriptu* a kaskádových stylů. Vytvořená aplikace je dostupná přes reaktivní webové rozhraní.

Ovládání je velice snadné, myši lze jednoduše přetáhnout jednotlivé uzly, dále nastavit a propojit je. Tímto způsobem lze snadno ovládat vstupy a výstupy řídicí jednotky. Existují i bloky, podporující přístup k hardwaru na Raspberry Pi. K dispozici je i široká paleta funkčních bloků, kterou lze snadno rozšířit o nové uzly. Výslednou aplikaci je možno přenést mezi různými počítači a prostředími ve formátu *JSON* souboru.



Obr. 3.5: Ukázka propojení uzlů v prostředí Node-RED

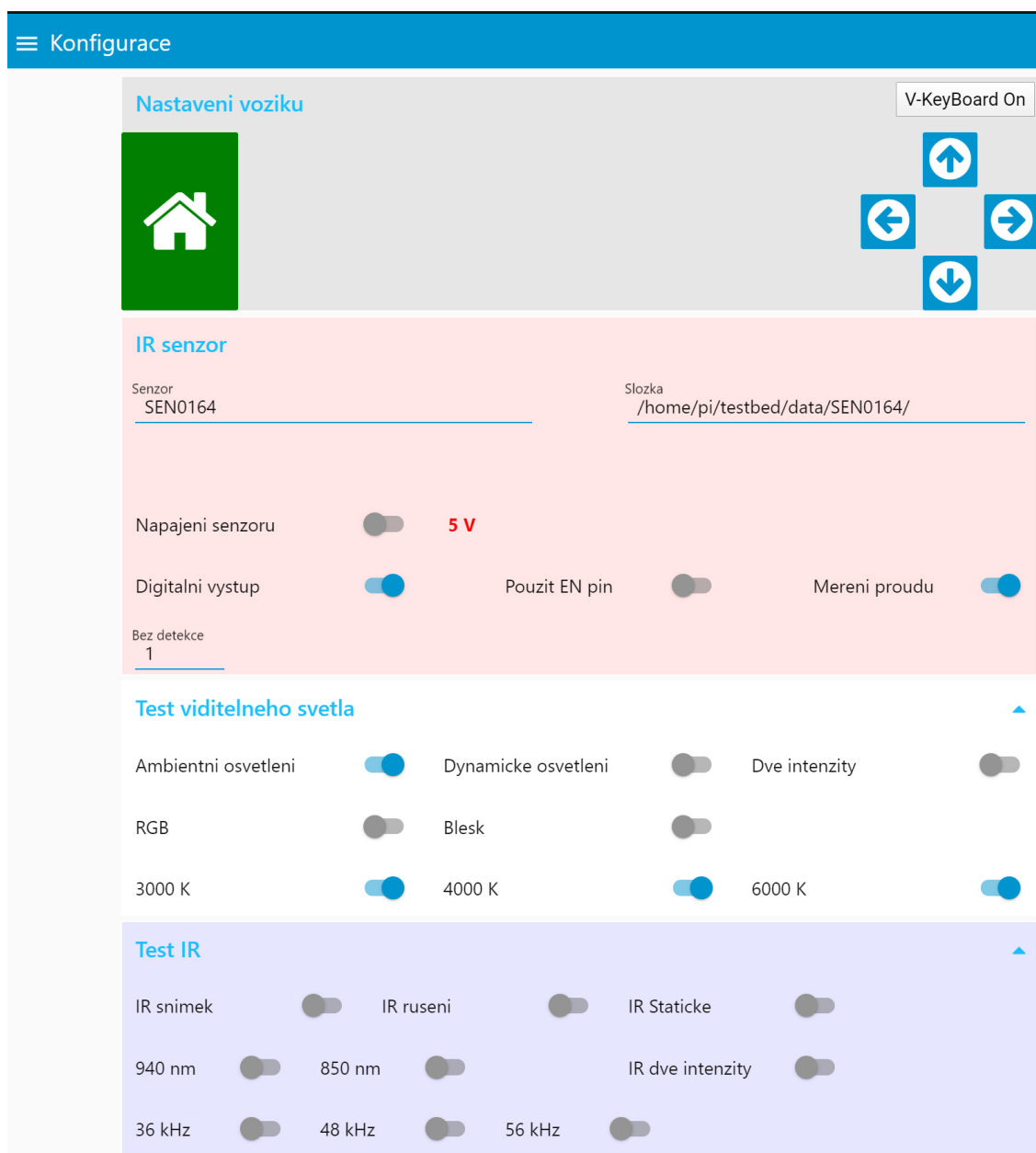
Na obrázku 3.5 je zobrazena sekvence uzlů, představující funkčnost stránky „O aplikaci“ z webového prostředí ovládacího programu testbedu. Nejdůležitějším blokem je červený blok *py\_get\_version*, který volá funkci v Pythonu pro získání verze firmwaru z jednotky Arduino Due. Číslo verze je pak předáno k zobrazení.

### 3.3.2 Nastavení průběhu testu senzoru

Podrobné rozložení webové stránky s nastavením parametrů testu je na obrázku 3.6. Na této stránce si uživatel nastaví parametry průběhu testu pro připojený senzor. Šipky v horní pravé části umožňují posunování vozíku po centimetrech, tlačítko domů přesune vozík do výchozí polohy. V horní části stránky se nastavuje jméno senzoru, které se bude používat ve výsledcích pro snadnou identifikaci. Dalším důležitým parametrem je nastavení cesty, kde se budou výsledky měření ukládat. Cesta musí být zvolena tak, aby do ní měl uživatel přístup. V závislosti na připojení snímače k desce senzoru je třeba, aby nastavení napájecího napětí a typu výstupu senzoru odpovídalo fyzickému propojení s deskou senzoru. Posledním prvkem je měření proudu tekoucí snímačem.

Ve střední části webové stránky je nastavení testování pomocí viditelného světla. V případě zaškrtnutí položky RGB, bude prováděno testování pro základní barvy, tedy červenou, zelenou a modrou. Mezi další ovládací prvky jsou nastavení teploty barvy. Zvolením volby blesk bude provedena simulace blesku o teplotě barvy 6000 K. Pokud se nezvolí možnost dvě intenzity, test bude probíhat pouze s vyšší intenzitou osvětlení, jinak se provedou dva testy po sobě, s vyšší a nižší intenzitou. Ambientní osvětlení znamená konstantní svícení LED pásků, dynamické pouští 50 Hz na LED pásky.

Spodní část stránky je zaměřena na testování pomocí infračerveného záření. Položka *IR snímek* slouží pro pořízení snímku pomocí Raspberry Pi kamery na promítacím plátně. Dále je zde možnost zvolení vlnové délky IR diod, 940 nm a 850 nm. Po zvolení *IR Statické* vysílají IR diody pouze konstantní signál. Test se provede pro každou IR diodu zvlášť, tedy nejprve pro levou, prostřední a pravou. Po zvolení *IR rušení* je na IR diody přiveden modulovaný signál o frekvenci, kterou si uživatel zvolí, jedná se o 36, 48, 56 kHz. Definice nastavení testu pro Node-RED je v příloze F a G. Definice proměnných je v příloze H.



Obr. 3.6: Nastavení konfigurace testu

### 3.3.3 Průběh testů a výsledky

Obrázek 3.7 ukazuje webovou stránku s průběhem testu. V horní šedé oblasti jsou ovládací tlačítka pro odstartování a zastavení testu. Stavový ukazatel zobrazuje průběh testu v procentech a je průběžně s každým provedeným testováním aktualizován.

Červená část stránky zobrazuje ukazatel aktuálního proudového odběru senzoru v mA. Tuto část lze sbalit pomocí tlačítka v horním rohu (modrá šipka), z důvodu malého rozměru displeje.

Střední zelená část obsahuje zjednodušený náhled naměřených hodnot z aktuálně probíhajícího testu. Na obrázku je znázorněno pomocí šedých tučných čar úhel  $\pm 30^\circ$ . Jednotlivé body představují detekci vozíku testovaným senzorem. Ve složce pro ukládání výsledků je uložen obrázek v *html* formátu, zobrazující naměřenou charakteristiku v polárních souřadnicích.

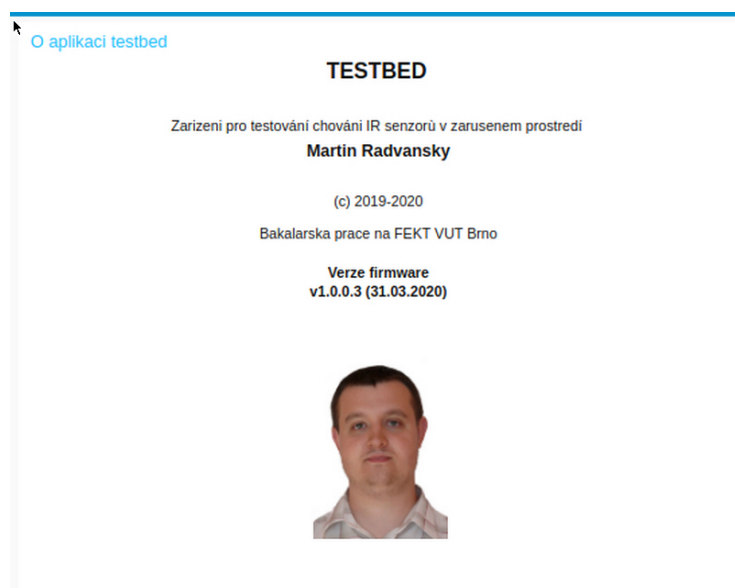
V případě, že byla zvolena varianta vytvoření IR snímku senzoru, je IR snímek, zobrazující plochu ozářenou testovacím senzorem, umístěn ve spodní části stránky.

### 3.3.4 Informace o verzi firmwaru

Poslední webovou stránkou 3.8 je stránka o aplikaci. Tato stránka je informací o verzi firmwaru, který je nahrán v řídicí jednotce hardwaru Arduino Due.



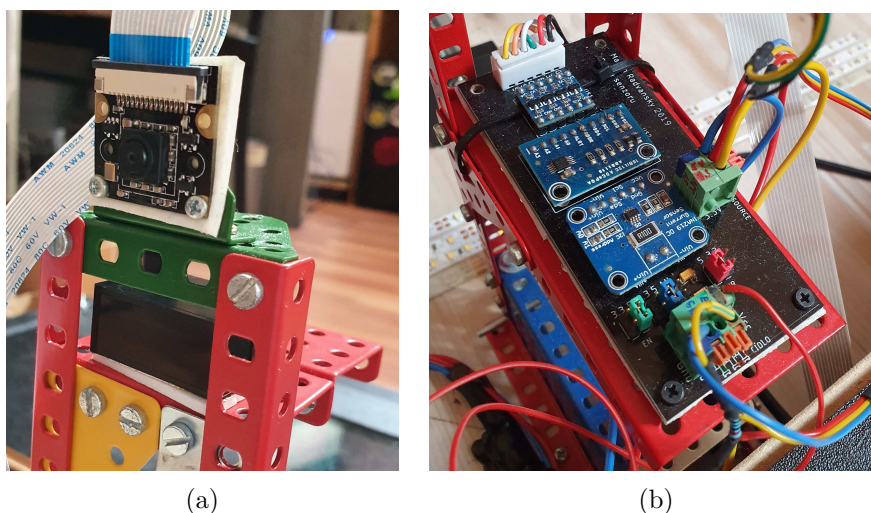
Obr. 3.7: Webová stránka s průběhem testu



Obr. 3.8: Webová stránka o aplikaci

## 4 Výsledky měření

Tato kapitola obsahuje využití automatizovaného testbedu pro měření parametrů vybraných senzorů, které byly představeny v kapitole 1.3. Vzhledem k tomu, že testbed umožňuje provedení až 66 testů jednoho senzoru, což odpovídá přibližně 7 hodinám testování senzoru, byly vybrány takové testy, které odpovídají rušivým vlivům, obvykle vyskytujících se na soutěžích minisumo.



Obr. 4.1: Připojení a umístění testovaného snímače

Před vlastním měřením se testovaný senzor vloží do rámu zařízení, konkrétně do pozice, která je na obrázku 4.1 (a) tak, aby byl zarovnan s přední hranou. Tím je dosaženo stejné vzdálenosti od testovacího vozíku pro všechny senzory. Dalším krokem je připojení výstupu testovaného senzoru do wago konektorů na desce plošných spojů, viz. obrázek 4.1 (b), dále je potřeba nastavit odpovídajícím způsobem propojky definující napěťové úrovně a napájení snímače.

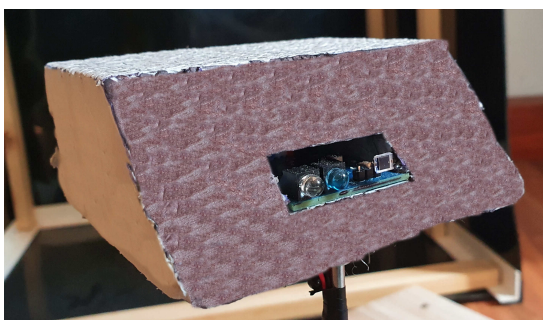
### 4.1 Měření parametry snímačů

Měření senzoru je prováděno na testovacím objektu, který rozměrově a tvarem odpovídá oponentovi (viz obrázek 4.2) pro soutěže kategorie minisumo. Přední strana tohoto objektu je zkosená a opatřena tmavým (hnědým) nátěrem z důvodu snížení odrazu IR záření.



Pro testování senzorů byly vybrány následující testy:

- **Základní detekční charakteristika senzoru.** Tento test probíhá bez rušivých vlivů.
- **Simulace blesku.** Při tomto měření se zjišťuje ovlivnění detekční charakteristiky senzoru způsobené světelnými záblesky, trvajících 100 ms a LED pásku o teplotě 6000 K při vysokém výkonu.
- **Chování senzoru v prostředí ambientního osvětlení.** LED pásek o barvě světla 3000 K simuluje východ a západ Slunce, 6000 K představuje denní světlo při lehce zamračené obloze.
- **Testování umělých zdrojů světla.** Teplota barvy 3000 K a frekvence 50 Hz odpovídá obyčejné žárovce, 4000 K představuje rušení halogenovou žárovkou.
- **Detekční plocha senzoru.** Pomocí IR kamery a projekčního plátna s vyznačeným rastrem 20×20 mm, lze ve vzdálenosti 200 mm zjistit velikost ozářené plochy IR vysílače senzoru.
- **Vliv IR rušení na funkci senzoru.** V tomto testu je využito modulovaného signálu o frekvenci 48 kHz, který je přiváděn na IR diodu emitující IR záření o vlnové délce 940 nm. Test je postupně prováděn v úhlech  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  vůči testovanému senzoru. Test ověřuje schopnosti detekce oponenta v soutěži minisumo, pokud je v blízkosti modulovaný zdroj IR záření.



Obr. 4.2: Detailní pohled na testovací objekt

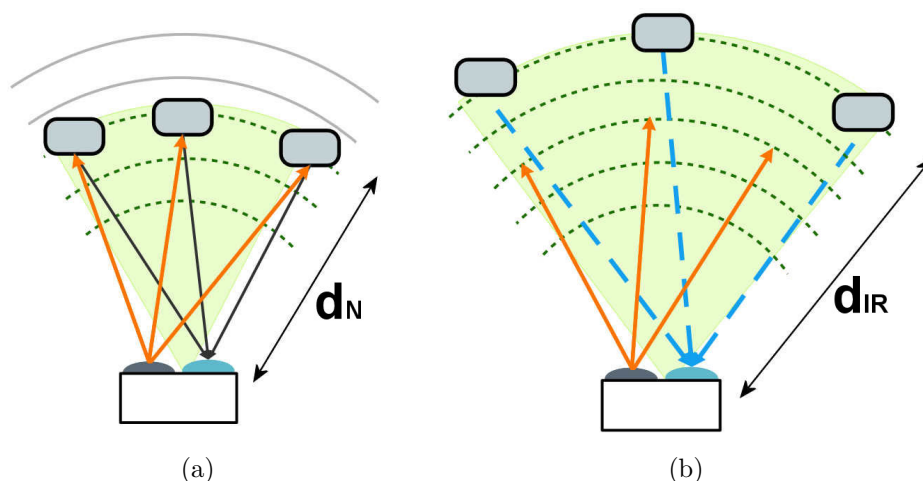
Výše uvedené testy se nastaví ve vizuálním prostředí pomocí dotykového displeje testbedu. Z vybraných testů vyplývá, že bude provedeno pro každý testovaný senzor celkem 10 testů, což představuje přibližně jednu hodinu testování pro každý senzor.

## 4.2 Vliv IR rušení na detekční vzdálenost

Jelikož pracujeme se senzory oponenta, detekční vzdálenost je klíčový parametr, který udává, jak daleko je oponent od robota. Pokud na senzor nepůsobí žádné IR rušení, je detekční oblast senzoru popsána obrázkem 4.3 (a). Ve spodní části obrázku

je vyznačen testovací senzor, kde na levé horní straně je vyznačen vysílací prvek senzoru a vedle něj se nachází přijímací komponenta. Oranžové šipky symbolizují vysílaný IR signál ze snímače, šedé objekty představují oponenta v různých pozicích. Černé šipky označují odražený signál, směřující do přijímacího prvku senzoru. Dále pak zelenou barvou je vyznačena detekční oblast senzoru. Vzdálenost  $d_N$  představuje maximální vzdálenost, při které dochází k detekci překážky.

Změna chování senzoru, který je ovlivněn IR rušením, je uvedena na obrázku 4.3 (b). Maximální detekční vzdálenost  $d_{IR}$  je větší než  $d_N$ . Toto prodloužení maximální detekční vzdálenosti současně i s úhlem detekce je způsobeno IR signálem, který je vysílán oponentem (modré čáry v obrázku). Ačkoliv se může zdát, že prodloužení detekční vzdálenosti je výhodné, opak je pravdou. Je třeba si uvědomit, že na robota minisumo je umístěno více senzorů a algoritmus chování robota se snaží nalézt umístění oponenta před robotem. V případě, že senzory jsou ovlivněny vysílaným IR signálem oponenta, nelze detekovat správně jeho pozici před robotem. Senzor, který je vhodný pro minisumo, by v ideálním případě neměl být ovlivněn zmíněným IR rušením oponenta.

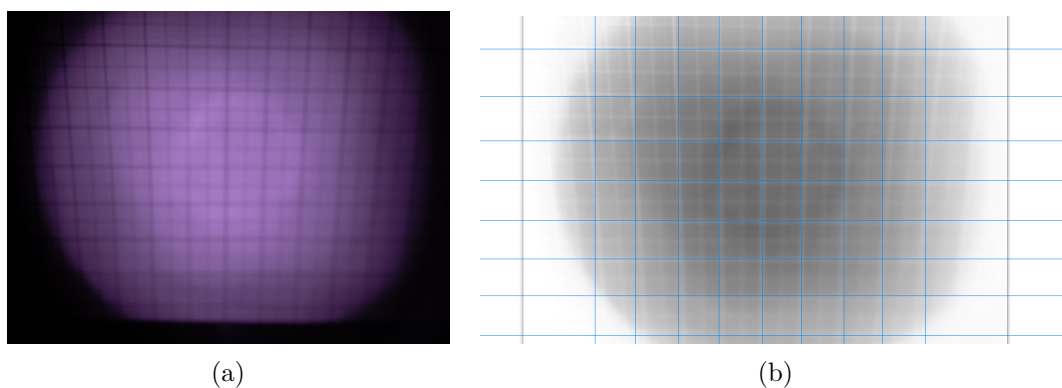


Obr. 4.3: Vliv IR rušení na detekční vzdálenost

### 4.3 Ozářená plocha snímačem

Jedním z dalších důležitých parametrů pro použití snímačů v robotických soutěžích minisumo je ozářená plocha snímačem. Čím větší je ozářená plocha, tím lépe senzor detekuje oponenta, protože se paprsek odráží od větší plochy oponenta. Nevýhoda velké ozářené plochy spočívá v potřebném velkém vysílacím výkonu IR diody, a tím i spotřebě senzoru. Na obrázku 4.4 (a) je zobrazen IR snímek ozářené plochy na

projekčním plátně s vyznačeným rastrem. Na obrázku 4.4 (b) je použito převodu obrázku do odstínů šedé a následné inverze barev. Pomocí grafického editoru je zvýrazněn rastr pro výpočet ozářené plochy.



Obr. 4.4: Ozářená plocha senzorem

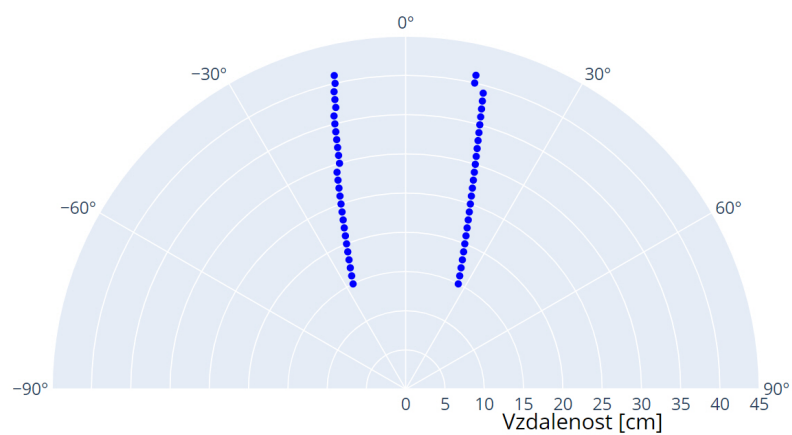
## 4.4 Naměřené výsledky jednotlivých snímačů

V následujících kapitolách budou prezentovány výsledky měření nad vybranými senzory. Pro každý senzor byly vybrány dvě detekční charakteristiky. Základní charakteristika slouží jako referenční (bez jakéhokoliv rušení) a druhý obrázek popisuje chování senzoru při působení modulovaného IR záření. Nedílnou součástí je i pořízený IR snímek pomocí Raspberry Pi kamery a ozářená plocha je uváděna ve formátu šířka×výška v mm. Datové soubory s výsledky a obrázky s charakteristikami popisující chování senzorů při denním a umělém osvětlení, simulací blesku a zbývající charakteristiky při IR rušení jsou uloženy na přiloženém CD.

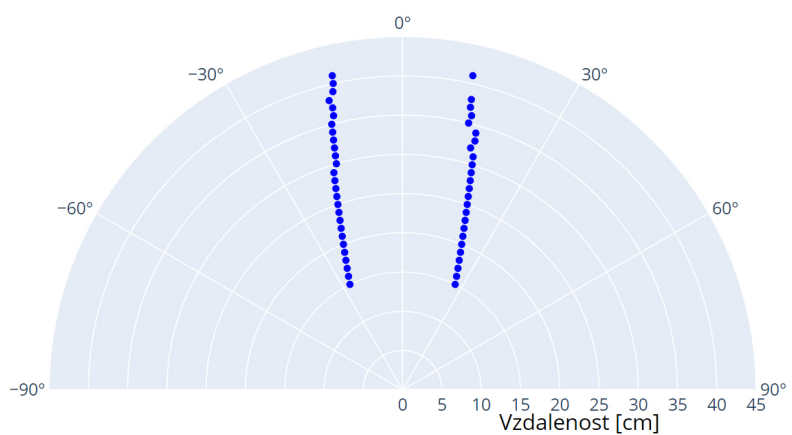
### 4.4.1 Senzor AMBA 240906 s digitálním výstupem

Výsledné charakteristiky senzoru AMBA jsou zobrazeny na obrázcích 4.5 a 4.6. Z prvního obrázku lze vyčíst, že ve vzdálenosti 15 cm je úhel detekce  $\pm 26^\circ$  a ve vzdálenosti 41 cm je úhel detekce  $\pm 12^\circ$ . V případě druhého obrázku je v detekční vzdálenosti 15 cm úhel detekce  $\pm 26^\circ$  a při 41 cm je úhel  $\pm 12^\circ$ . V průběhu testování byl měřen průměrný odběr senzoru, který činil 4,5 mA.

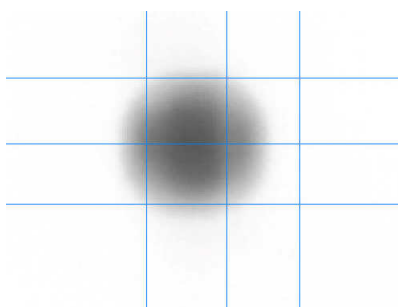
Z charakteristik plyne, že u testovaného snímače nebyla změřena významná odchylka v případě, že bylo použito IR rušení. Na základě ostatních změřených charakteristik lze říci, že tento senzor je imunní vůči IR modulovanému rušení a ostatním simulovaným typům rušení v rozsahu  $-45^\circ$  až  $45^\circ$ . Z IR snímku 4.7 lze odečíst rozměr ozářené plochy 30×40 mm.



Obr. 4.5: Základní charakteristika snímače AMBA 240906



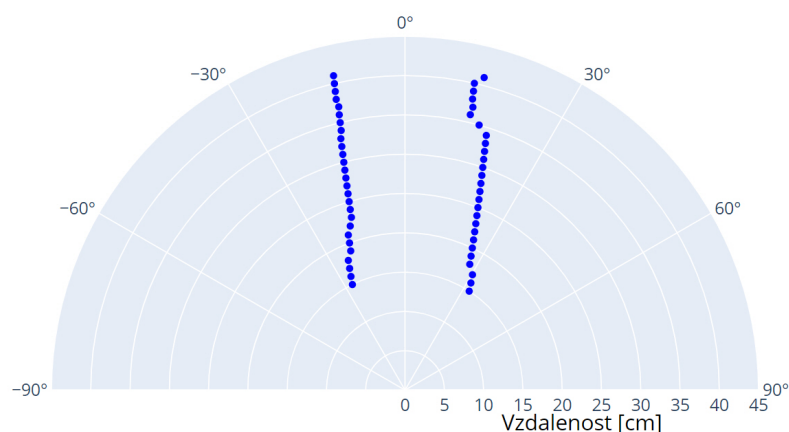
Obr. 4.6: Charakteristika snímače AMBA 240906 při IR rušení



Obr. 4.7: Ozářená plocha vysílačem snímače AMBA 240906

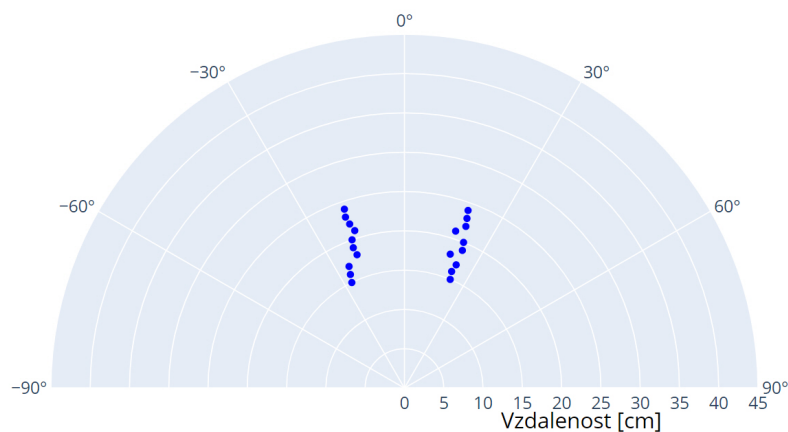
#### 4.4.2 Senzor SHARP GP2Y0A60SZ0F s analogovým výstupem

Charakteristiky jsou uvedeny na obrázcích 4.8, 4.9. V základním testu ve vzdálenosti 15 cm je úhel detekce  $-26^\circ$  až  $33^\circ$ . Pro vzdálenost 41 cm je úhel detekce v rozsahu  $-12^\circ$  až  $14^\circ$ .



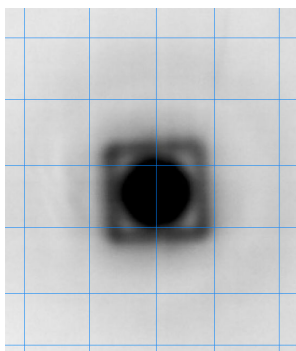
Obr. 4.8: Základní charakteristika snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F

Druhý obrázek vykazuje zvláštní chování. Při působení IR rušení přímo proti tomuto snímači dochází k výraznému snížení detekční vzdálenosti. Ve vzdálenosti 15 cm je detekční úhel  $-26^\circ$  až  $22^\circ$ , vzdálenost 24 cm má úhel detekce  $-18^\circ$  až  $19^\circ$ . Průměrný proudový odběr je 21,5 mA. Výsledné charakteristiky naznačují, že



Obr. 4.9: Charakteristika snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F při IR rušení

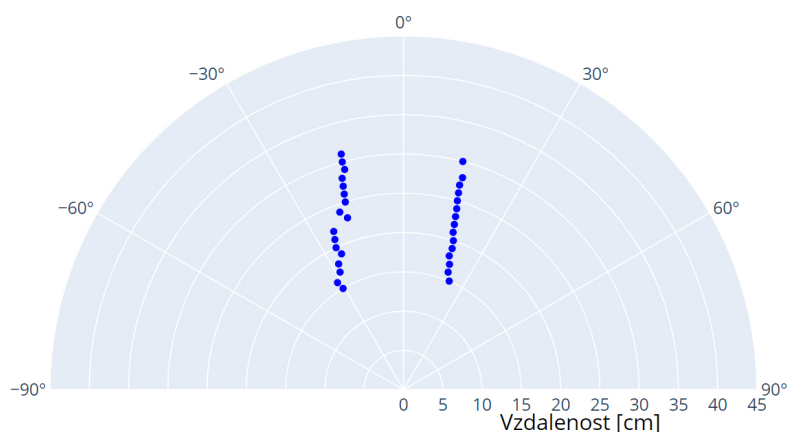
kromě působení modulovaného IR signálu přímo proti testovanému snímači je senzor téměř imunní vůči rušivým vlivům nebo jen zanedbatelně mění výsledný průběh od základního průběhu. Změřená vyzářená plocha z obrázku 4.10  $40 \times 30$  mm.



Obr. 4.10: Ozářená plocha vysílačem snímače SHARP GP2Y0A60SZ0F

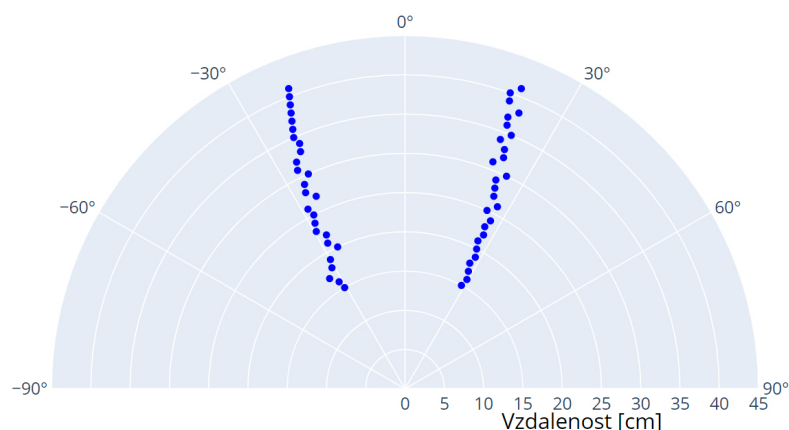
#### 4.4.3 Senzor JSUMO JS40 s digitálním výstupem

Změřené charakteristiky jsou na obrázcích 4.11, 4.12. První snímek bez rušivých vlivů vykazuje při detekční vzdálenosti 15 cm úhel detekce  $-30^\circ$  až  $22^\circ$ . Při maximální detekční vzdálenosti, která činí 31 cm, je úhel detekce  $\pm 14^\circ$ .

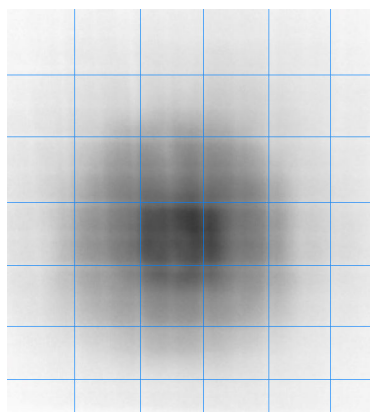


Obr. 4.11: Základní charakteristika snímače JSUMO JS40

Druhý obrázek potvrdil, že působením IR modulovaným rušivým signálem má snímač prodlouženou detekční vzdálenost. Při vzdálenosti 15 cm je úhel detekce  $-30^\circ$  až  $28^\circ$ , u vzdálenosti 41 cm je úhel detekce  $\pm 21^\circ$ . Průměrný odběr testovaného snímače činil 21,5 mA. Z naměřených výsledků lze konstatovat, že tento testovaný snímač nelze použít v místech, kde je přítomno IR rušení. U dalších testů se snímač projevoval podobným způsobem nebo detekoval náhodně pozice v krajních mezích úhlů detekce. Změřená ozářená plocha z obrázku 4.13 činí  $70 \times 80$  mm.



Obr. 4.12: Charakteristika snímače JSUMO JS40 při IR rušení

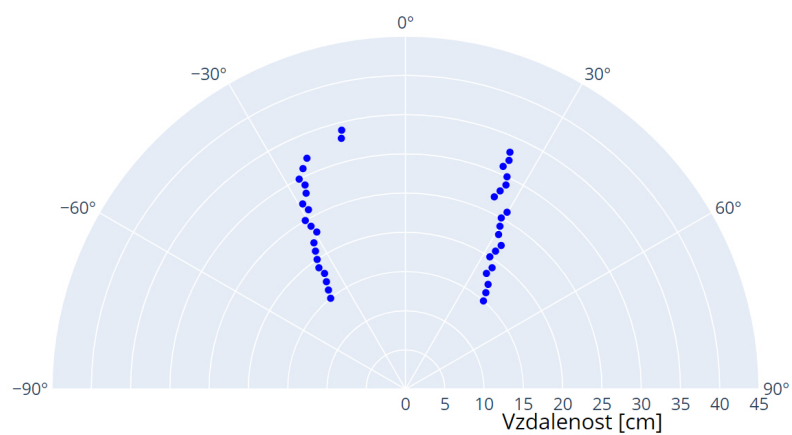


Obr. 4.13: Ozářená plocha vysílačem snímače JSUMO

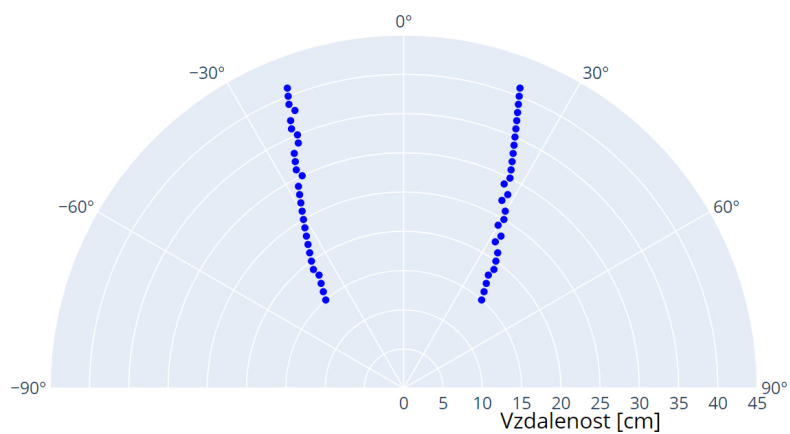
#### 4.4.4 Senzor DFRobot SEN0164 s digitálním výstupem

Naměřené průběhy jsou na obrázcích 4.14, 4.15. Základní charakteristika ukazuje, že při vzdálenosti 15 cm je hodnota úhlu detekce  $-39^\circ$  až  $41^\circ$ . Při vzdálenosti 32 cm je pak úhel detekce  $\pm 23^\circ$ . U druhého obrázku opět dochází vlivem působení modulovaného IR signálu k navýšení detekční vzdálenosti. Při vzdálenosti 15 cm je úhel detekce  $\pm 41^\circ$ , u 41 cm je úhel  $21^\circ$ . Průměrný odebíraný proud je 45,5 mA. Z uvedených průběhů je patrné, že působení IR modulovaného signálu na měřený snímač značně ovlivňuje detekční vzdálenost. Proto není vhodné tento snímač používat v soutěžích minisumo, kde by docházelo k falešné detekci oponenta. Navíc odebíraný proud je značně vysoký, při umístění například pěti čidel do robota, máme pouze z těchto periférií odebíraný proud okolo 220 mA.

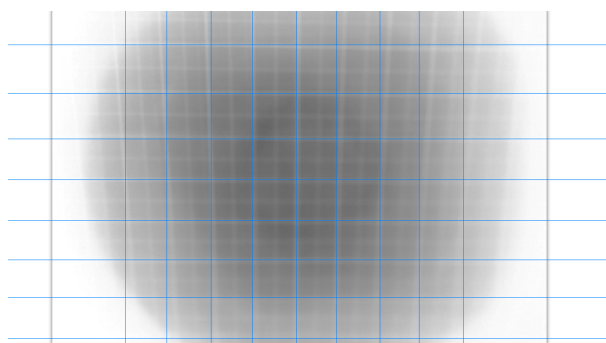
Obrázek 4.16 ukazuje velkou ozářenou plochu o rozměrech  $180 \times 180$  mm, čemuž odpovídá i proudový odběr snímače.



Obr. 4.14: Základní charakteristika snímače DFRobot SEN0164



Obr. 4.15: Charakteristika snímače DFRobot SEN0164 při IR rušení

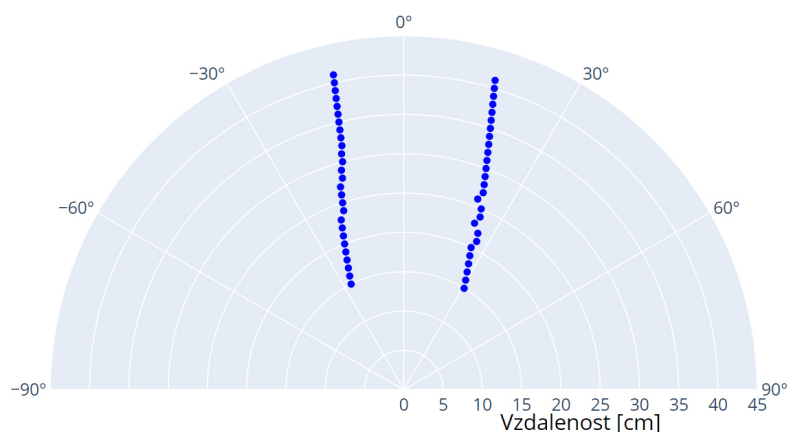


Obr. 4.16: Ozářená plocha vysílačem snímače DFRobot SEN0164



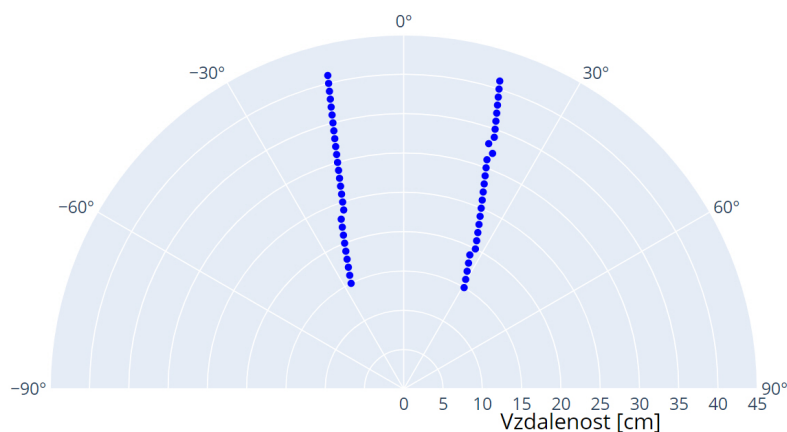
#### 4.4.5 Senzor E18-D80NK s digitálním výstupem

Výsledné průběhy jsou na obrázcích 4.17, 4.18. Základní charakteristika obsahuje následující údaje: pro vzdálenost 15 cm má úhel detekce  $-26^\circ$  až  $30^\circ$  a ve vzdálenosti 41 cm je  $-12^\circ$  až  $16^\circ$ . Infračervený modulovaný signál se téměř nepodílí na změně



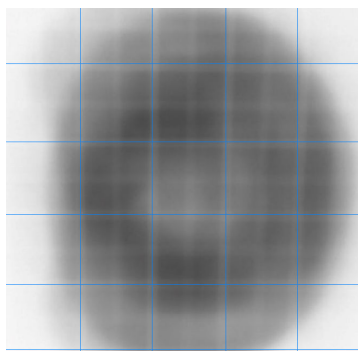
Obr. 4.17: Základní charakteristika snímače E18-D80NK

detekce objektu, při 15 cm je úhel detekce  $-26^\circ$  až  $30^\circ$ , při vzdálenosti 41 cm je úhel detekce  $-13^\circ$  až  $17^\circ$ . Naměřený průměrný odebíraný proud je 35,4 mA.



Obr. 4.18: Charakteristika snímače E18-D80NK při IR rušení

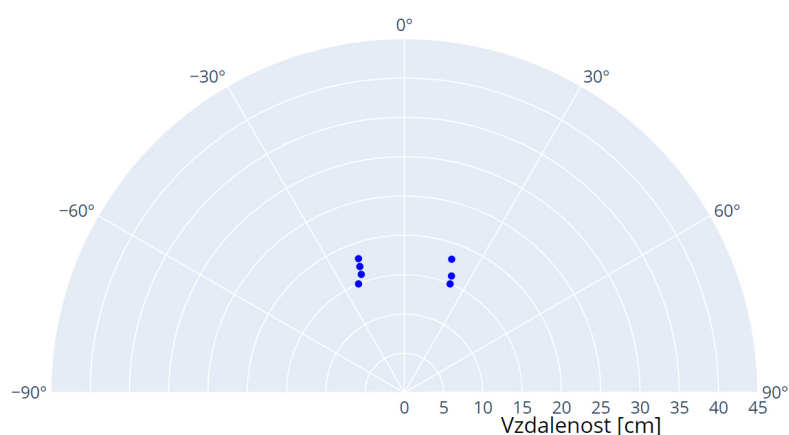
Dle ostatních naměřených charakteristik se jeví tento snímač jako odolný vůči rušivým vlivům. Bohužel, kvůli svým rozměrům by bylo nutné vymyslet, jak umístit dostatečný počet snímačů na robota. Z obrázku 4.19 lze zjistit, že plocha ozářená vysílačem z testovaného snímače je o rozměrech  $80 \times 100$  mm.



Obr. 4.19: Ozářená plocha vysílačem snímače E18-D80NK

#### 4.4.6 Digitální senzor překážky Pololu

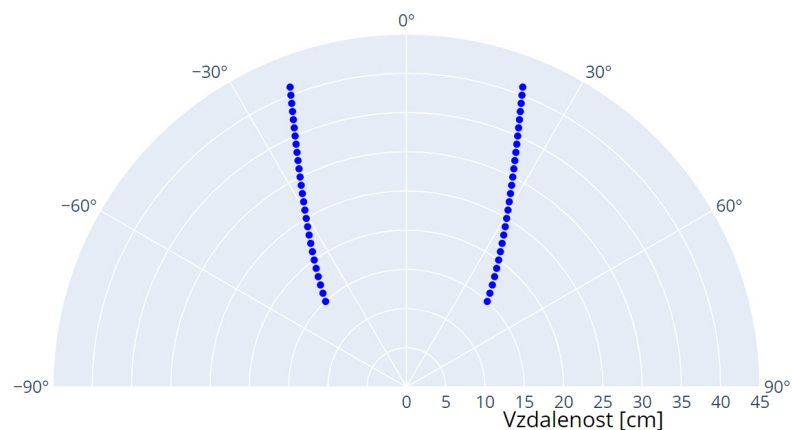
Výsledné charakteristiky snímače Pololu jsou na obrázcích 4.20, 4.21. Základní test vykazuje nízkou detekční vzdálenost, která činí 15 cm s úhlem detekce  $\pm 22^\circ$  a při vzdálenosti 18 cm, je úhel detekce  $\pm 19^\circ$ . Už i při tomto testu je jasné, že se nehodí do robotických soutěží minisumo z důvodu malého dosahu.



Obr. 4.20: Základní charakteristika snímače POLOLU

Při působení IR rušení na druhém obrázku však dochází k velmi výraznému navýšení detekční vzdálenosti a téměř k dvojnásobnému úhlu detekce. Při 15 cm detekční vzdálenosti je úhel detekce  $\pm 43^\circ$ , při 41 cm je úhel detekce  $\pm 21^\circ$ . Zde se opět potvrdilo, že je tento snímač od firmy Pololu nevhodný pro roboty minisumo. Průměrný proudový odběr činí 5 mA.

IR rušení představuje zásadní problém pro tento snímač. Další testy se výrazně neprojeví na naměřených charakteristikách, maximální detekční vzdálenost byla zhruba 18 cm. IR rušení z jakéhokoli úhlu od  $-45^\circ$  až  $45^\circ$  vykreslí charakteristiku stejnou jako na obrázku 4.21.



Obr. 4.21: Charakteristika snímače POLOLU při IR rušení

Obrázek z Raspberry Pi kamery bohužel není k dispozici, protože kamera nezachytila žádné vyzařování vysílače z testovaného snímače. Je to nejspíš způsobeno příliš malým proudovým odběrem a navrženým obvodem.

Výsledky provedeného měření napovídají, že naměřená detekční vzdálenost senzoru neodpovídá katalogovým hodnotám výrobce. V tomto konkrétním případě by se mohlo jednat o záměnu dodaného senzoru, protože naměřené hodnoty detekce odpovídají přibližně jinému typu senzoru téhož výrobce, který má stejnou konstrukci a nelze jej snadno prostým okem rozpoznat.

## 5 Zhodnocení výsledků

V této části budou srovnány naměřené charakteristiky pro jednotlivé senzory s přihlédnutím jejich využitelnosti jako senzorů oponenta v soutěži minisumo.

### 5.1 Hodnotící kritéria

Pro reálné použití senzorů v soutěži minisumo je třeba zohlednit u jednotlivých testovaných senzorů následující faktory:

- **Rozměr snímače.** Vzhledem k tomu, že je omezena velikost soutěžního robota (100×100 mm), je třeba zohlednit, zda je možné na robota umístit více senzorů dané velikosti.
- **Hmotnost.** Hmotnost robota je omezena pravidly na 500 g, a tedy je potřeba i toto brát v potaz.
- **Průměrný proud senzorem.** Vyšší počet snímačů na robotovi a relativně malá kapacita baterie, vede k nutnosti použít snímače s nízkým odběrem.
- **Doba odezvy senzoru.** U robota požadujeme co nejrychlejší dobu odezvy snímače, z důvodu co nejpresnější detekce oponenta.
- **Ovlivnění detekčních schopností senzoru v prostředí denního osvětlení.** Průběh osvětlení se za soutěžní den mění, a tím vytváří pro každý zápas unikátní podmínky.
- **Reálná detekční vzdálenost.**
- **Velikost ozářené plochy vysílačem senzoru.**
- **Ovlivnění detekčních schopností senzoru v prostředí umělého osvětlení.** Koná-li se zápas v uzavřených prostorách, kde světlo poskytují umělé zářiče, může docházet ke změnám detekce snímače.
- **Ovlivnění detekčních schopností senzoru vlivem blesku z fotoaparátu.**
- **Vliv modulovaného IR záření na detekční vzdálenost snímače robota.**
- **Cena snímače.**

### 5.2 Srovnání parametrů senzorů

V tabulce 5.1 jsou srovnány vybrané vlastnosti z katalogových listů jednotlivých senzorů, přičemž sloupce *Detekční vzdálenost* a *Proud senzorem* za lomítkem obsahují hodnotu, která byla změřena pomocí testbedu. Maximální hodnota detekční vzdálenosti u testbedu je 41 cm.

Název snímače	Rozměry $\text{š} \times \text{v} \times \text{h}$ [mm]	Hmotnost [g]	Doba odezvy [ms]	Detekční vzdálenost kat./měř. [cm/cm]	Proud senzorem kat./měř. [mA/mA]	Cena [Kč]
AMBA	14×31×20	8,5	8	60/41	5,5/4,5	1200
SHARP	22×8×7	4,3	21,5	150/41	40,0/21,5	250
JSUMO	17×11×12	4,0	1	40/31	15/21	350
SEN	30×13×25	9,5	2	50/32	25/45	300
E18	18×18×45	8,6	2	80/41	45/35	180
Pololu	10×5×15	2,5	1	60/18	16/5	160

Tab. 5.1: Tabulka základních parametrů senzorů

## 5.3 Vytvoření škály hodnotících kritérií

Pro srovnání snímačů mezi sebou, je nutné vytvořit hodnotící škálu. Při hodnocení budeme používat 2 stupně. První stupeň, označený (−), představuje parametr nevyhovující. Druhý stupeň, reprezentován znakem (+), se dále považuje za vyhovující.

### 5.3.1 Metodika přiřazení stupňů k parametrům snímače

- **Rozměr snímače.** Pro porovnání rozměrů bylo použito srovnání objemu senzorů a robota. Při uvážení pěti použitých senzorů, musí být objem snímačů do 10 % objemu celého robota ( $400 \text{ cm}^3$ ), aby byl považován, jako vyhovující.
- **Hmotnost.** Čím menší hmotnost, tím je výhodnější pro použití v robota. Jako hranice bylo stanoveno, že pět senzorů má maximálně 5 % maximální povolené hmotnosti robota, což je 25 g.
- **Změřený proud senzorem.** Z důvodu omezené kapacity napájecího zdroje robota (obvykle 750 mAh) je vhodné použít snímače s co nejmenším průměrným odebíraným proudem. Jako hraniční hodnotu proudu lze považovat pro pět senzorů 75 mA, což činí maximálně 15 mA na jeden senzor.
- **Doba odezvy senzoru.** Zhodnocení reakční doby senzoru vychází z běžné rychlosti robota, která je pro zjednodušení brána jako  $1 \text{ ms}^{-1}$ . Stanovená akceptovatelná hranice je do 10 ms. Za tuto dobu se robot posune o 1 cm na soutěžní ploše. Při rozměru robota  $100 \times 100 \text{ mm}$ , který je v pohybu, je v ideálním případě dosaženo až deseti možných detekcí oponenta, což lze považovat za dostatečné.
- **Reálná detekční vzdálenost.** Soutěžní plocha je kruhová o průměru 77 cm, dostačující detekční vzdálenost je zvolena minimálně 35 cm.

- **Velikost ozářené plochy.** Čím větší ozářená plocha, tím lépe lze zachytit oponenta. Stanovená hranice je nad 20 cm<sup>2</sup>.
- **Změna detekčních schopností senzoru.** V případě, že nedošlo k výrazné změně mezi referenční a naměřenou charakteristikou, a to v úhlu detekce nebo detekční vzdálenosti, je tento stav označen jako vyhovující požadavkům.
- **Cena snímačů.** Akceptovatelná cena pro pět použitých senzorů je na hranici 1500 Kč.

## 5.4 Porovnání naměřených charakteristik

Tabulka 5.2 je vyplněna podle kritérií v předchozí kapitole, kde (+) označuje vyhovující stav, (−) nevyhovující a nevyplněné pole znamená, že informace není dostupná nebo nebyla naměřena.

Parametr	AMBA	SHARP	JSUMO	SEN	E18	Pololu
Rozměry	−	+	+	−	−	+
Hmotnost	−	+	+	−	−	+
Doba odezvy	+	−	+	+	+	+
Detekční vzdálenost	+	+	−	−	+	−
Proud senzorem	+	−	−	−	−	+
Cena	−	+	−	+	+	+
Ozářená plocha	−	−	+	+	+	
Denní osvětlení	+	+	+	−	+	+
Blesk	+	+	−	+	+	+
Umělé osvětlení	+	+	−	−	+	+
IR rušení	+	−	−	−	+	−

Tab. 5.2: Tabulka hodnocení vhodnosti senzorů

V závislosti na počtu pozitivních parametrů, které splňují naše požadavky, lze senzory uspořádat v následujícím pořadí:

1. E18, Pololu
2. AMBA, SHARP
3. JSUMO
4. SEN

Zhodnocením pořadí, které vychází z tabulky 5.2, můžeme konstatovat následující závěry:

Na první příčce se umístily senzory E18 a Pololu. Senzor E18 dosahoval dobrých výsledků v detekční vzdálenosti a odolnosti vůči IR rušení, ale jeho nevýhodou tvoří rozměry a hmotnost, kdy téměř vylučuje použití pěti senzorů na jednom robotu. Mezi další problémy patří vysoký proud tekoucí senzorem. Jeho vysoká odolnost vůči vnějším vlivům je způsobena pravděpodobně jeho mechanickou konstrukcí, kdy je přijímač a vysílač senzoru umístěn hluboko v pouzdru snímače.

Snímač Pololu od stejnojmenného výrobce by podle katalogového listu měl patřit mezi kvalitnější senzory, tak dle provedených měření tomu tak není a senzor se umístil do této skupiny především kvůli svým malým rozměrům a hmotnosti. Oblast, kde naopak propadl, je odolnost vůči rušení. Senzor v zarušeném prostředí prakticky detekoval v rozsahu  $90^\circ$  ve vzdálenosti 41 cm. Testovaný snímač vykazoval mimořádně malou detekční vzdálenost oproti hodnotám uvedených v datasheetu.

Další v pořadí se umístila skupina senzorů AMBA, SHARP. Snímač AMBA z pohledu funkčnosti a odolnosti vůči IR rušení by byl nejlepším volbou. Problémem tohoto senzoru je jeho vysoká cena a velké rozměry, včetně malé ozářené plochy.

Senzor SHARP patří mezi analogové senzory, přičemž nám je schopen poskytnout informaci o vzdálenosti od oponenta. Mezi základní nevýhody senzoru patří velký odebíraný proud, pomalá doba reakce a malá ozářená plocha. V průběhu odolnosti na IR rušení bylo u tohoto senzoru zjištěno zásadní snížení detekční vzdálenosti téměř na polovinu. Toto může způsobeno tím, že tento senzor využívá triangulační metodu, kdy ozářením vnějším zdrojem IR záření dojde ke změně úhlu na přijímací prvek PSD, a tím dojde ke zkrácení vzdálenosti.

V třetí kategorii se umístil překvapivě senzor JSUMO, ačkoliv tento výrobce doporučuje senzor přímo pro použití v soutěžích minisumo a opírá se o své zkušenosti, kdy se sám účastní těchto soutěží. Měřením bylo zjištěno, že tento senzor nevyhovuje téměř ve všech testovaných vlastnostech.

Na posledním místě se umístil senzor SEN0164. Největším problémem u tohoto senzoru byl pozorovatelný vliv simulace denního osvětlení a IR rušení, která ovlivnila detekční vzdálenost. Mezi další nevýhody patří vyšší odebíraný proud, hmotnost a rozměry senzoru.

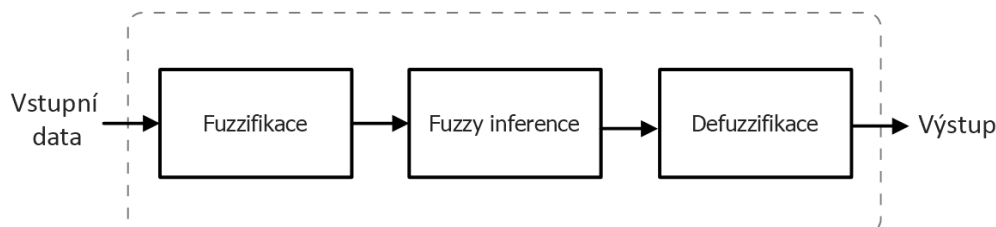
## 5.5 Výběr optimálního senzoru s využitím fuzzy logiky

V předchozí kapitole bylo navrženo hodnocení senzorů založené na vhodnosti či nevhodnosti sledovaného parametru jako metoda pro výběr nejlepšího snímače z množiny testovaných. Tento postup nesplnil očekávání z pohledu nejednoznačnosti výběru. Přirozeným požadavkem na hodnotící systém je zahrnutí důležitosti nejen samotných naměřených hodnot, ale i parametrů mezi sebou, do rozhodovacího procesu.

Vzhledem k tomu, že při porovnávání naměřených hodnot je třeba posoudit, k jak velké změně v uvedených charakteristikách došlo, lze s úspěchem využít vyjádření této změny pomocí fuzzy logiky a lingvistických proměnných (např. změnu detekční charakteristiky senzoru při rušení lze přirozeně popsat slovy: *bez vlivu*, *malý vliv*, *střední vliv*, *velký vliv*). Zpracování hodnot, vyjádřenými lingvistickými proměnnými, se zabývá *fuzzy logika* a pro podporu rozhodování lze s úspěchem použít *Fuzzy rozhodovacích systémů*.

### 5.5.1 Proces fuzzy zpracování dat

Fuzzy logika měří jistotu či nejistotu příslušnosti prvku k množině. Tvorba systému s fuzzy logikou sestává ze tří základních kroků: *fuzzifikaci*, *fuzzy inferenci* a *defuzzifikaci*, tyto kroky jsou znázorněny na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Rozhodování řešené fuzzy zpracováním

Prvním krokem se převádí reálné proměnné na jazykové proměnné. Definování jazykových proměnných vychází z lingvistických proměnných vyjadřující míru hodnocení, změny. Obvykle se užívá tři až sedmi atributů pro každou hodnocenou proměnnou. Pomocí matematické funkce nebo expertem je následně vyjádřen stupeň členství proměnné v množině. Existuje mnoho tvarů členských funkcí, přičemž mezi standardní funkce patří například: *lambda*, *Z* a *S*.

Ve fuzzy inferenci dochází k definici pravidel, které mají podobu známou z vyšších programových jazyků (*if-then*). Tyto definovaná pravidla si lze představit jako obdobu expertního systému. Výsledkem fuzzy inference je jazyková proměnná převádějící vstupní data na výstupní fuzzy hodnotu.



Poslední krok převádí jazykovou proměnnou pomocí defuzzifikace na reálné hodnoty. Výstupem defuzzifikace je tedy převod vstupní fuzzy hodnoty tak, aby byla dále použitelná při řízení, či případně v dalším zpracování mimo fuzzy systém. [39]

### 5.5.2 Vytvoření fuzzy rozhodovacího systému

Pro vytvoření navrhovaného rozhodovacího systému byly použity metody, které se často používají při řešení rozhodovacích problémů a přímo vychází z popisu v literatuře [39]. Vzhledem k malému počtu senzorů a jejich vlastností, které se u nich hodnotí, je navrhovaný rozhodovací systém vytvořen v prostředí Microsoft Excel a datový soubor je také přiložen na CD, které je součástí této práce.

Prvním krokem při vytvoření tohoto systému je vytvoření vstupní převodní matice. Obrázek 5.2 obsahuje ukázkou části tabulky v excelu, která obsahuje jak rozdělení některých parametrů na intervaly hodnot, tak použití lingvistických proměnných pro hodnocení vlivu rušení. Tyto lingvistické proměnné pro kategorizaci změny detekčních schopností, byly vytvořeny na základě porovnání stavů bez vnějšího rušení a s vnějším rušením. Rozdělení do jednotlivých intervalů hodnot bylo zvoleno na základě zkušeností a s využitím znalosti minimálních a maximálních hodnot daného parametru.

Vstupní převodní matice				
	Rozměry [objem v cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost [g]	Doba odezvy [ms]	Vliv IR rušení [940 nm, 48 kHz]
1	< 2,00	< 3,00	< 2,00	bez vlivu
2	2,00 – 4,99	3,00 – 5,99	2,00 – 4,99	malý vliv
3	5,00 – 9,99	6,00 – 8,99	5,00 – 9,99	střední vliv
4	≥ 10,00	≥ 9,00	10,00 – 19,99	velký vliv
5			≥ 20	

Obr. 5.2: Část vstupní převodní tabulky

Následným krokem je vytvoření transformační matice. Jejím účelem je mapování intervalu nebo lingvistické hodnoty parametru na bodové hodnocení, které číselně vyjadřuje důležitost jeho hodnoty. Nastavená hodnota bodového hodnocení je zvolena tak, aby vypovídala o důležitosti/vhodnosti vstupní proměnné na daném intervalu. V případě, že klademe na určité atributy větší důraz, je nutné bodovou škálu odpovídajícím způsobem zvětšit v jejím rozsahu. Pokud by byla důležitost všech atributů stejná, potom je rozsah bodového hodnocení třeba nastavit u všech atributů stejně. Viz. obrázek 5.3.

Protože při výběru senzoru může existovat více pohledů, podle kterých chceme senzory hodnotit, byly v rámci navrhovaného rozhodovacího systému vytvořeny dvě

Transformační matice s prioritou: Doba odezvy, Detekční vzdálenost, Proud				
<b>1</b>	Rozměry	Hmotnost	Doba odezvy	Vliv IR rušení
1	100	100	500	100
2	80	90	480	70
3	60	80	430	50
4	30	70	30	10
5			5	
1800	100	100	500	100

Obr. 5.3: Část transformační matice

transformační matice, které kladou důraz na různé vlastnosti měřených senzorů z pohledu jejich použitelnosti. V příloze I je v transformační matici č. 1 kladen důraz na atributy *Doba odezvy* (5× důležitější parametr), *Detekční vzdálenost* (3×) a *Proud* (2×) než na zbytek atributů, které mají v transformační matici nastaven rozsah bodového hodnocení na hodnoty 0–100.

Posledním nezbytným předpokladem pro funkční rozhodovací systém je sestavení stavových matic pro každý hodnocený senzor. Tato matice má shodný počet sloupců a řádků jako převodní matice. Nastavení obsahu jednotlivých polí stavové matice je provedeno takovým způsobem, že pokud naměřená charakteristika senzoru leží v odpovídajícím rozsahu převodní matice, je v příslušném poli zadána hodnota „1“, jinak je pole prázdné.

Přílohy J a K ukazují stavové matice, které obsahují přiřazení parametrů všech šesti testovaných senzorů do intervalů bodového hodnocení.

Rozhodovací systém vypočítá výsledné hodnocení pro každý senzor s využitím funkce *Skalární součin* mezi *stavovou maticí* a *transformační maticí*. Podílem získané hodnoty a součtu maximálních hodnot použitých v transformační matici je proveden převod hodnocení na procenta. K získání slovního popis hodnocení senzoru je použita *retransformační matice*, viz. obrázek 5.4, pomocí které je procentuální hodnota převedena na výsledné doporučení ve formě slovního popisu.

Retransformační matice	
Hodnocení v [%]	Doporučení
0-34	Nedoporučeno k použití
35-49	Lze použít s omezeními
50-74	Lze použít
75-84	Vhodné k použití
85-100	Doporučeno použít

Obr. 5.4: Retransformační matice rozhodovacího systému

### 5.5.3 Zhodnocení senzorů s prioritou detekce oponenta

Jeden z možných pohledů na hodnocení vhodnosti senzoru je varianta, kdy je nejdůležitějším faktorem rychlost detekce, detekční vzdálenost a odebíraný proud senzorem. U těchto charakteristik byly nastaveny preference pomocí zvětšení jejich rozsahů bodového hodnocení v transformační matici 1 v příloze I. Zbytek parametrů je považován za rovnocenný a jejich bodové hodnocení bylo nastaveno na rozsah 0–100. Výsledné hodnocení pomocí rozhodovacího systému je na obrázku 5.5. Mezi nejlépe hodnocené podle zvolených kritérií patří senzory AMBA (86 %) a JSUMO (85 %).

Výsledek hodnocení senzorů - varianta 1		
Preference:	Doba odezvy, Detekční vzdálenost, Proud	
Senzor	Doporučení	Hodnocení [%]
AMBA	Doporučeno použít	86
SHARP	Lze použít	62
JSUMO	Doporučeno použít	85
SEN	Vhodné k použití	77
E18	Vhodné k použití	84
Pololu	Lze použít	74

Obr. 5.5: Hodnocení senzorů s preferencí detekce oponenta

### 5.5.4 Zhodnocení senzorů s prioritou odolnosti vůči IR rušení

Jiným pohledem na hodnocení senzorů může být priorita odolnosti vůči vnějšímu IR rušení a ta přímo odpovídá spolehlivosti detekce oponenta. V tomto případě byly vybrány tyto atributy s vyšší prioritou: *IR rušení*, *Doba odezvy*, *Rozměry*, *Detekční vzdálenost*. Ostatní parametry jsou ponechány se stejnou váhou. Výsledné doporučení získaného z rozhodovacího systému je na obrázku 5.6. Senzor, který nejlépe splňuje požadovaná kritéria je senzor AMBA (87 %).

### 5.5.5 Zhodnocení výsledků rozhodovacího systému

Získané výsledky ukazují, že nejlepším senzorem z pohledu rychlosti a vzdálenosti detekce i z pohledu odolnosti vůči IR rušení se jako nejlepší volba jeví senzor Panasonic AMBA. Vytvořený rozhodovací systém tak potvrdil skutečnost, že tyto senzory jsou v zahraničí a to zejména ve východní Asii a Japonsku velmi oblíbené a používány v soutěžích minisumo. Mezi jejich nevýhody patří zejména větší rozměry,

Výsledek hodnocení senzorů - varianta 2		
Preference:	IR rušení, Doba odezvy, Rozměry, Detekční vzdálenost	
Senzor	Doporučení	Hodnocení [%]
AMBA	Doporučeno použít	87
SHARP	Lze použít s omezeními	47
JSUMO	Lze použít	58
SEN	Lze použít s omezeními	46
E18	Vhodné k použití	84
Pololu	Lze použít	51

Obr. 5.6: Hodnocení senzorů s preferencí odolnosti vůči IR rušení

cenová hladina a horší dostupnost na českém trhu. Tyto nevýhody lze částečně eliminovat menším počtem použitých senzorů a objednáváním v zahraničí.

Výsledky, které byly získány z rozhodovacího systému poskytují různé možnosti ohodnocení jednotlivých parametrů snímačů a tak získání objektivního hodnocení senzorů. Proti první metodě, která byla založena pouze na binárním hodnocení vhodnosti, či nevhodnosti daného parametru, poskytuje tento rozhodovací systém kromě bodového ohodnocení, také hodnocení slovním popisem, což umožňuje rychlou orientaci ve výsledcích, obzvláště v případě, kdy by se pracovalo s větším množstvím srovnávaných senzorů.

V aktuální verzi, tento rozhodovací systém obsahuje pouze šest testovaných senzorů, ale lze jej velmi jednoduchým způsobem rozšířit. Doplnění dalších senzorů do rozhodovacího systému by znamenalo pouze doplnění stavové matice pro každý nový senzor a přidání nového řádku výpočtu do tabulky výsledků. Vzhledem k použití tabulky v Excelu, je tento rozhodovací systém velmi snadno přenosný, pochopitelný a lehce upravitelný.

# Závěr

Tato práce se zabývá návrhem automatizovaného testovacího přípravku (testbedu) určeného pro otestování detekčních schopností infračervených senzorů překážky, které jsou často používány jako detektory oponenta v soutěžích kategorie minisumo.

V úvodu této práce je provedena rešerše metod pro detekci překážky či vzdálenosti, pro senzory pracující v oblasti infračerveného záření, která je dále následována shrnutím základních vlastností pro šest vybraných senzorů.

Hlavní část této práce tvoří návrh a fyzická realizace automatizovaného testbedu. Obsahuje popis a vytvoření mechanické konstrukce, návrh ovládací elektroniky využívající Arduino Due a Raspberry Pi. Vytvořené zařízení je určeno k měření změny detekčního rozsahu senzorů v závislosti na vnějších světelných podmínkách. Zařízení je proto navrženo pro simulaci denního osvětlení, umělého osvětlení a rušení způsobeného vnějším modulovaným IR zářením.

Programové řízení testbedu se skládá ze tří hlavních částí. Pro ovládání hardwaru deskou Arduino DUE je program vytvořen v jazyku Wiring C. Řízení průběhu testů, ukládání a vizualizace dat je prováděno pomocí skriptů v jazyce Python na jednodeskovém počítači Raspberry Pi 4. Grafické prostředí na dotykovém displeji, které je určeno pro co nejjednodušší obsluhu testbedu, je vytvořeno v prostředí Node-RED. Zařízení lze ovládat i vzdáleně přes webový prohlížeč, pokud je testbed připojen do lokální počítačové sítě.

Závěrečná část této práce je věnována srovnání naměřených charakteristik vybraných senzorů. Její součástí je vytvoření metodiky pro hodnocení jednotlivých charakteristik senzorů tak, aby šlo testované senzory mezi sebou snadno porovnávat. Aby bylo možné do budoucna srovnávat i nově změřené senzory, je vytvořen jednoduchý hodnotící systém v prostředí Microsoft Excel, který je schopen na základě přednastavených priorit ohodnotit senzory z pohledu jejich použitelnosti.

Mezi další funkce, které je možné v budoucnu doplnit patří například: zvýšení testovacího rozsahu, zjemnění kroků posunu při měření, vytvoření a správa databáze naměřených výsledků či převod rozhodovacího systému do podoby samostatné aplikace.

# Literatura

- [1] *Robot MiniSumo* [online]. Bogota DC, Kolumbie: TDROBOTICA, 2015 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<http://aprender.tdrobotica.co/robot-minisumo/>>.
- [2] *Black Magic Mini Sumo Robot Kit (Full Kit - Not Assembled)* [online]. Istanbul, Turkey: JSumo, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.jsumo.com/blackmagic-mini-sumo-robot-kit-full-kit>>
- [3] *K SV - The Sumovore Mini-Sumo Robot Kit* [online]. Solarbotics [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.robotshop.com/uk/solarbotics-k-sv-sumovore-mini-sumo.html>>
- [4] *ExSpurt* [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<http://brooksbots.com/ExSpurt.html>>
- [5] *Check out our 2015 selection for a fun and educational Christmas!* [online]. Generation Robots, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.generationrobots.com/blog/en/check-out-our-2015-selection-for-a-fun-and-educational-christmas/>>
- [6] *Delta Force Mini Sumo Robot* [online]. Dale Heatherington, 2001 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<http://www.wa4dsy.com/robot/deltaforce/index.html>>
- [7] *Have A Nice Day Mini-Sumo Robot* [online]. David Cook [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.robotroom.com/Have-A-Nice-Day.html>>
- [8] *DFROBOT SEN0013* [online]. Ostrava, Mariánské Hory: TME Czech Republic [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.tme.eu/cz/details/df-sen0013/cidla-vzdalenosti/dfrobot/sen0013/>>
- [9] *TF02 - LiDAR Rangefinder* [online]. Niwot (USA): SparkFun, 2019 [cit. 2019-10-12]. Dostupné z:  
<<https://www.sparkfun.com/products/retired/14578>>
- [10] *HC-SR04 Cheap Ultrasonic Sensor* [online]. Istanbul, Turkey: JSumo, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:  
<<https://www.jsumo.com/hc-sr04-cheap-ultrasonic-sensor>>

- [11] *MODERNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE A JEJICH APLIKACE* [online]. UTEE FEKT VUT V BRNĚ: Miloslav Steinbauer [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://docplayer.cz/565323-Moderni-svetelne-zdroje-a-jejich-aplikace.html>>
- [12] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 200 s. ISBN 978-80-7300-114-4.
- [13] *Quick primer on pulse-ranging technology (PRT) sensors* [online]. Elisabeth Eitel, 2013 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://www.machinedesign.com/automation-iiot/sensors/article/21831657/quick-primer-on-pulseranging-technology-prt-sensors>>
- [14] *Aplikace s technologií 3D Time of Fly (ToF) snadno a rychle* [online]. Stephen Evanczuk, Digi-Key, 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z:   
<<https://vyvoj.hw.cz/aplikace-s-technologie-3d-time-of-fly-tof-snadno-a-rychle.html-0>>
- [15] *Experimental physics - How could I measure the colour spectrum of a light bulb ... radiation curve? - Physics Stack Exchange* [online]. paradox124, 2017 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://physics.stackexchange.com/questions/350528/how-could-i-measure-the-colour-spectrum-of-a-light-bulb-and-investigate-how-clos>>
- [16] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 248 s. ISBN 80-730-0141-1.
- [17] *AMBA240906* [online]. Thief River Falls, USA: Digi-Key, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://www.digikey.com/product-detail/en/panasonic-electronic-components/AMBA240906/AMBA240906-ND/5130783>>
- [18] *Adjustable Infrared Sensor Switch SKU SEN0164 DFRobot* [online]. Shanghai, China: DFRobot [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<[https://wiki.dfrobot.com/Adjustable\\_Infrared\\_Sensor\\_Switch\\_SKU\\_SEN0164](https://wiki.dfrobot.com/Adjustable_Infrared_Sensor_Switch_SKU_SEN0164)>
- [19] *E18-D80NK Adjustable Infrared Sensor Switch 3-80cm* [online]. Indie: ROBU.IN [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://robu.in/product/e18-d80nk-adjustable-infrared-sensor-switch-3-80cm/>>

- [20] *Pololu Carrier with Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor 10-150cm, 3V* [online]. Las Vegas, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://www.pololu.com/product/2476/resources>>
- [21] *JS40F Digital Distance Sensor (Min. 40 cm Range)* [online]. Istanbul, Turkey: JSumo, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://www.jsumo.com/js40f-digital-distance-sensor-min-40-cm-range>>
- [22] *Pololu 38 kHz IR Proximity Sensor, Fixed Gain, High Brightness* [online]. Las Vegas, Nevada, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z:   
<<https://www.pololu.com/product/2578>>
- [23] *Ultrasonic Distance Sensor - HC-SR04* [online]. Niwot, USA: SparkFun [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<<https://www.sparkfun.com/products/15569>>
- [24] *Ultrasonic Ranging Module HC-SR04* [online]. Ivy, 2014 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z:   
<[https://www.itead.cc/wiki/Ultrasonic\\_Ranging\\_Module\\_HC-SR04](https://www.itead.cc/wiki/Ultrasonic_Ranging_Module_HC-SR04)>
- [25] *Arduino DUE R3 SAM3X8E 32-bit ARM Cortex-M3* [online]. Havlíčkův Brod, Česká republika: ECLIPSERA [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:   
<<https://arduino-shop.cz/arduino/1129-arduino-due-r3-sam3x8e-32-bit-arm-cortex-m3.html>>
- [26] *Arduino Due* [online]. RoboDoupě, 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:   
<<http://robodoupe.cz/2012/arduino-due/>>
- [27] *Raspberry Pi 4 Model B - 4GB RAM* [online]. České Budějovice, Roudné, Česká republika: rpishop, 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:   
<<https://rpishop.cz/raspberry-pi-4b/1598-raspberry-pi-4-model-b-4gb-ram-765756931182.html>>
- [28] *Raspberry Pi 4 Model B - 4GB RAM* [online]. Praha 7, Holešovice, Česká republika: Alza.cz a.s., 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:   
<<https://www.alza.cz/raspberry-pi-4-model-b-4gb-ram-d5655286.htm>>
- [29] *7inch Capacitive Touch Screen LCD (H), 1024×600, HDMI, IPS, Various Systems Support* [online]. Shenzhen, China: Waveshare,[cit. 2020-05-20]. Dostupné z:



- <<https://www.waveshare.com/product/raspberry-pi/displays/lcd-oled/7inch-hdmi-lcd-h.htm>>
- [30] *FEETECH Sub-Micro Servo FS0403* [online]. Las Vegas, Nevada, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://www.pololu.com/product/3421>>
- [31] *High torque hybrid stepping motor specifications* [online]. Las Vegas, Nevada, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://www.pololu.com/file/0J685/SY42STH47-1206A.pdf>>
- [32] *A4988 Stepper Motor Driver Carrier* [online]. Las Vegas, Nevada, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://www.pololu.com/product/1182>>
- [33] *Logic Level Shifter, 4-Channel, Bidirectional* [online]. Las Vegas, Nevada, USA: Pololu, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://www.pololu.com/product/2595>>
- [34] *ADS1015 / ADS1115* [online]. USA: Adafruit, [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-analog-to-digital-converters/ads1015-slash-ads1115>>
- [35] *Adafruit INA219 Current Sensor Breakout* [online]. USA: Adafruit, [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout>>
- [36] *Programovatelný generátor signálu AD9833* [online]. Jihlavská 1985, Havlíčkův Brod, Česká republika: Arduino Návody, [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <<https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/programovatelny-generator-signalu-ad9833.html>>
- [37] *OpenCV* [online]. OpenCV team, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <<https://opencv.org/>>
- [38] *NODE-RED* [online]. UniPi.technology, 2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <<https://www.unipi.technology/cs/produkty/node-red-66>>
- [39] DOSTÁL, Petr. *Pokročilé metody analýz a modelování v podnikatelství a veřejné správě*. s.r.o. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2008. 333 s. ISBN 978-80-7204-605-8.

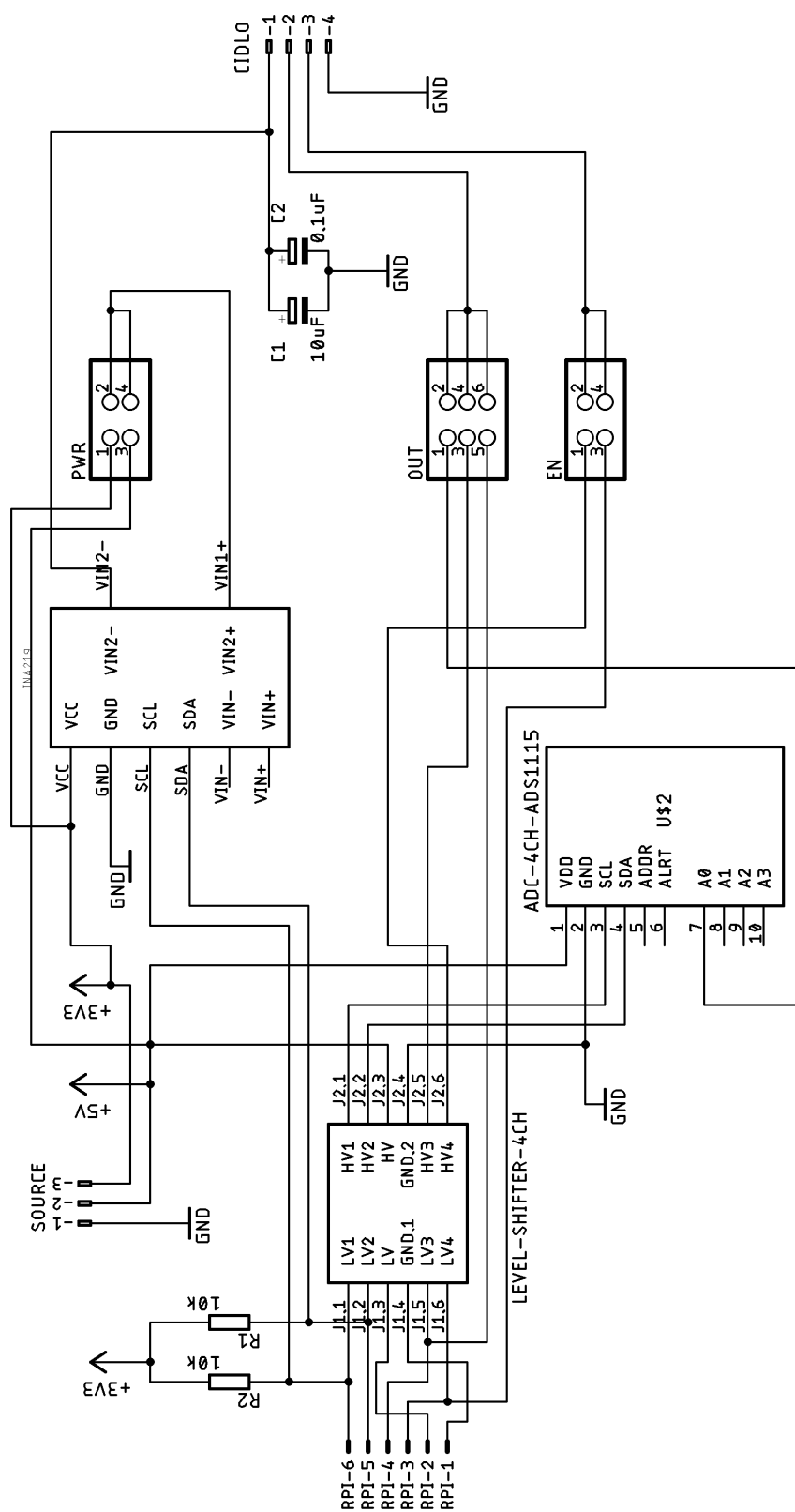
## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>ADC</b>	analogově digitální převodník
<b>CAN</b>	vnitřní komunikační sběrnice
<b>CSV</b>	textový formát souborů
<b>DAC</b>	digitálně analogový převodník
<b>DC</b>	stejnoseměrný proud
<b>GPIO</b>	univerzální vstupně výstupní piny
<b>GUI</b>	grafické uživatelské rozhraní
<b>IR</b>	infračervené záření
<b>I<sup>2</sup>C</b>	typ komunikační sběrnice
<b>JSON</b>	textový formát souborů
<b>LAN</b>	lokální počítačová síť
<b>LCD</b>	displej pro zobrazení informací
<b>LED</b>	světlo emitující dioda
<b>LUT</b>	vyhledávací tabulka
<b>PWM</b>	pulzně šířková modulace
<b>RGB</b>	označení barev u LED diod
<b>RPi</b>	Raspberry Pi – řídicí mikropočítač
<b>RS232</b>	typ komunikační sběrnice
<b>RS485</b>	typ komunikační sběrnice
<b>SD</b>	typ paměťové karty
<b>SPI</b>	typ komunikační sběrnice
<b>TOF</b>	doba letu paprsku
<b>UART</b>	asynchronní sériové rozhraní
<b>USB</b>	univerzální sériová sběrnice

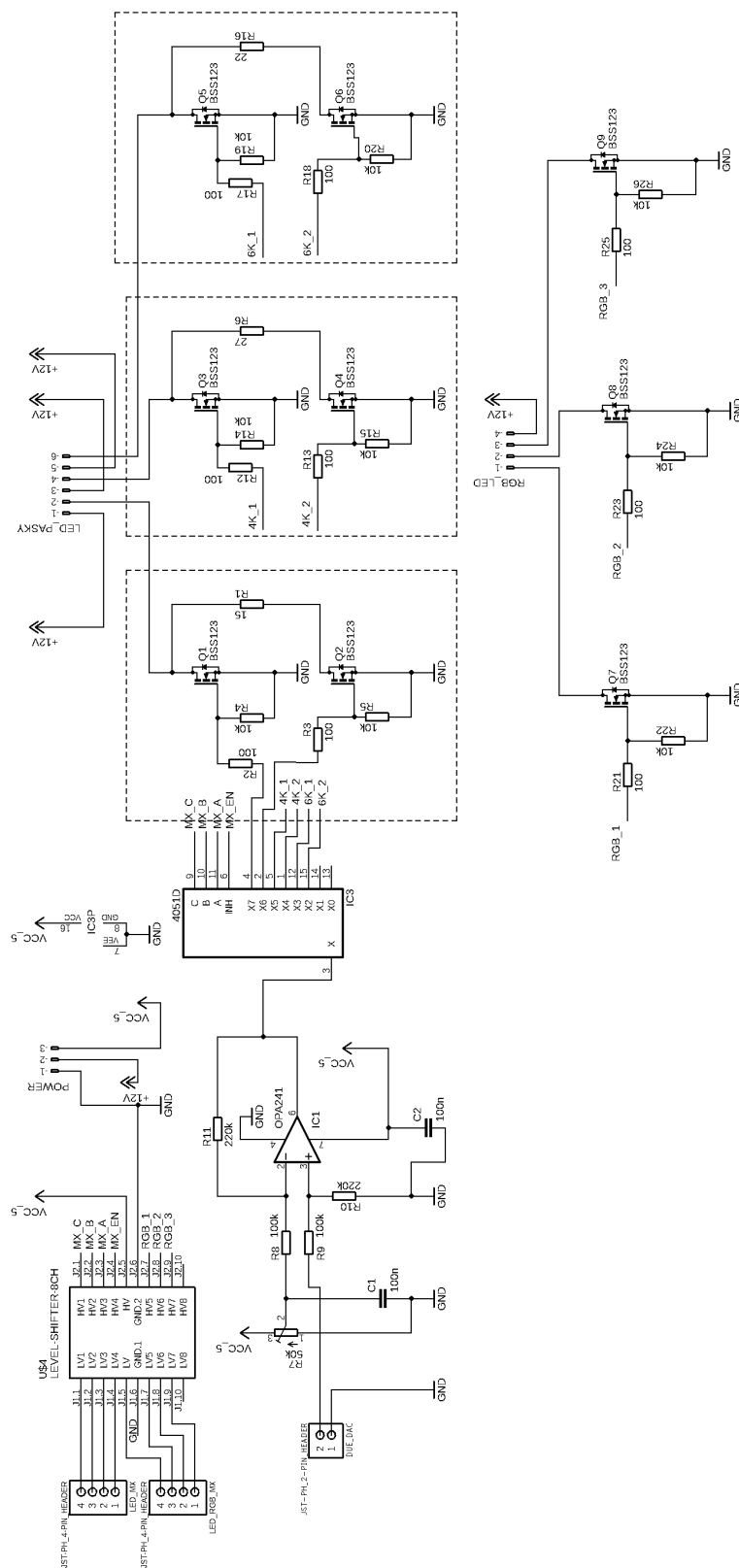
# Seznam příloh

A	Schéma desky pro připojení senzoru	87
B	Schéma desky ovladačů LED	88
C	Schéma desky ovládání vysílačů IR LED	89
D	Schéma desky pro ovládání motorů	90
E	Ukázka log souboru testu	91
F	Node-RED - Definice stránky průběhu testu	92
G	Node-RED - Definice stránky nastavení testu	93
H	Node-RED - Definice proměnných	94
I	Vstupní převodní a transformační matice	95
J	Stavová matice senzorů I	96
K	Stavová matice senzorů II	97
L	Obsah přiloženého CD	98

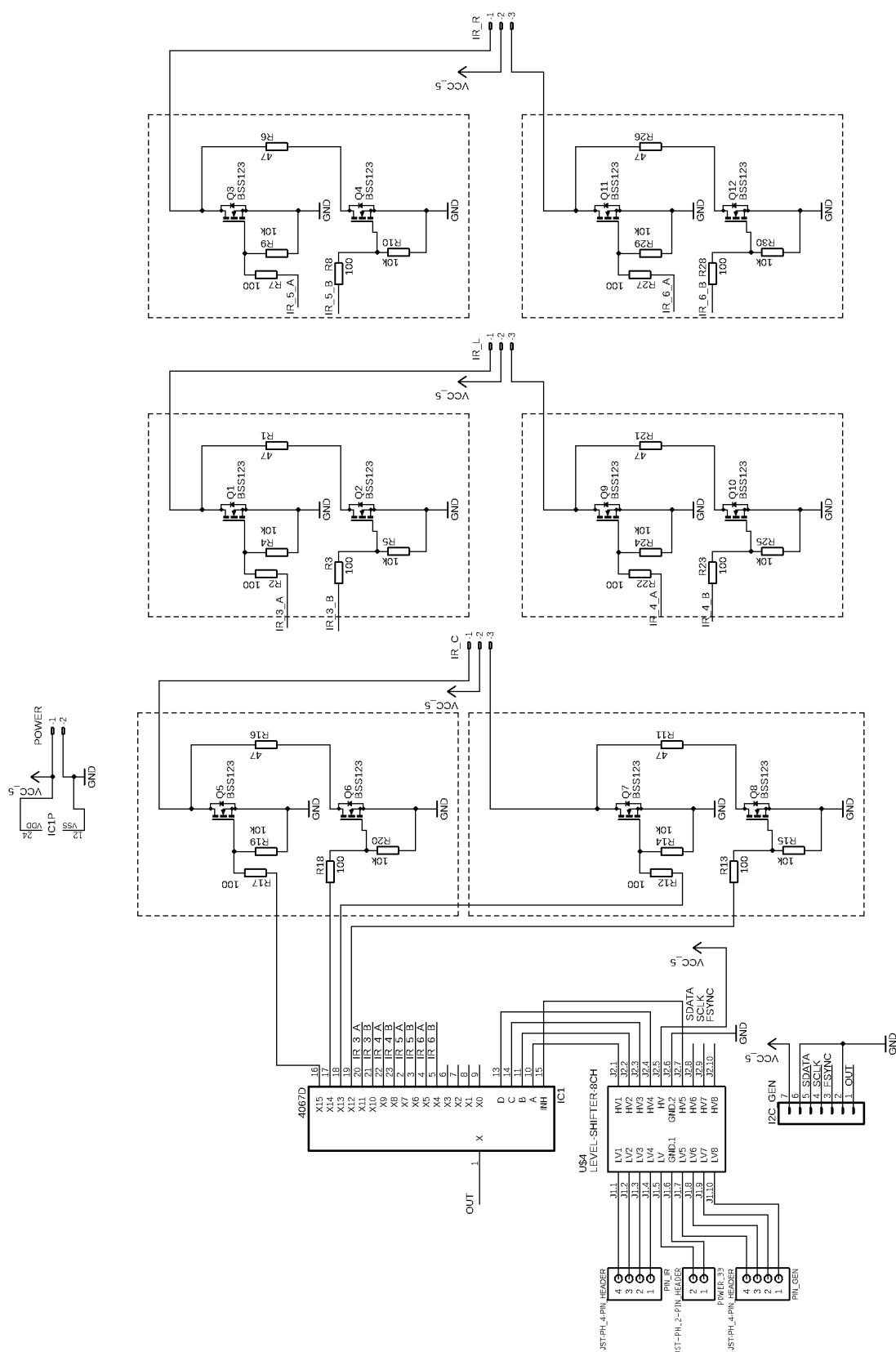
## A Schéma desky pro připojení senzoru



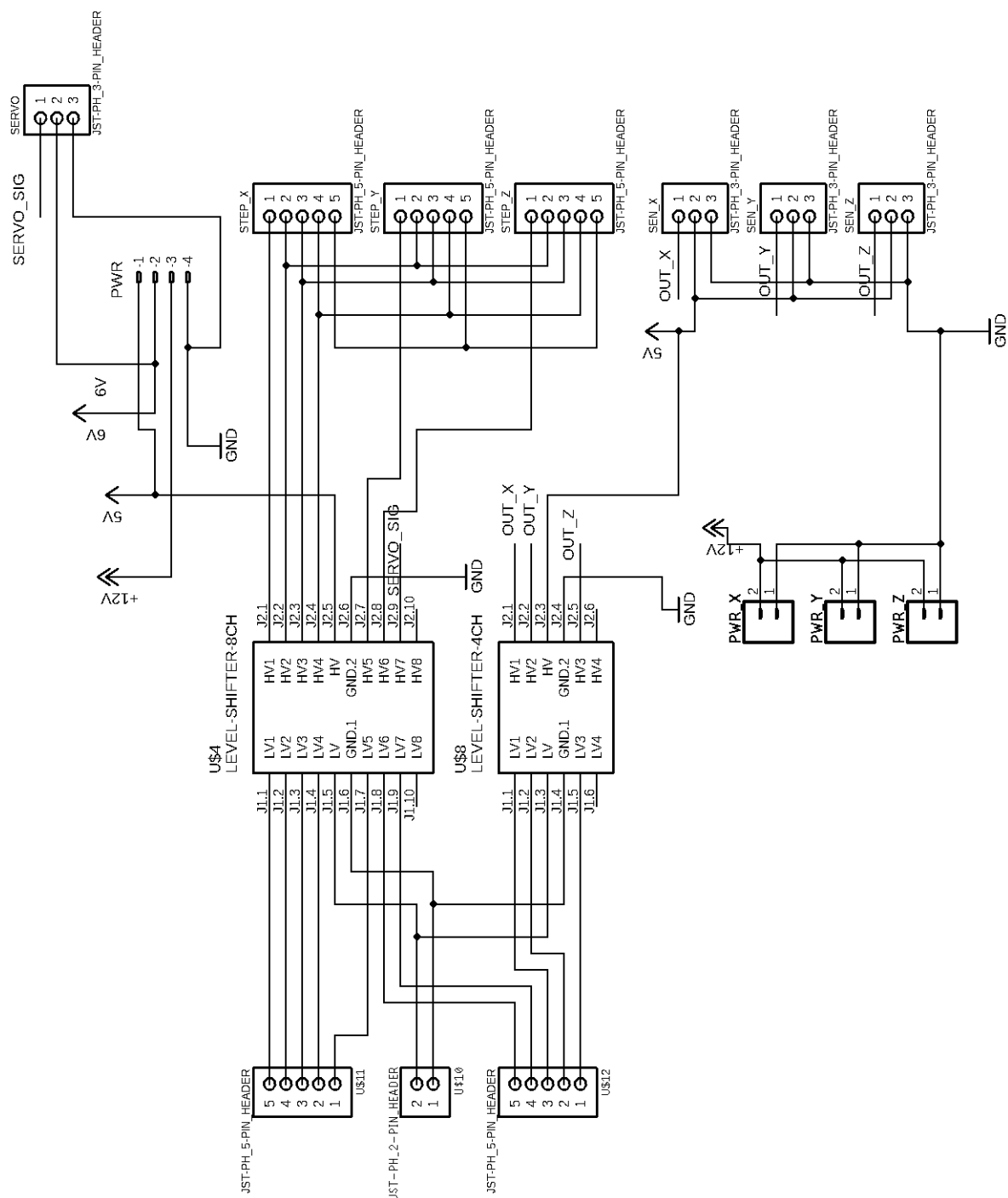
## B Schéma desky ovladačů LED



# C Schéma desky ovládaní vysílačů IR LED



## D Schéma desky pro ovládání motorů



## E Ukázka log souboru testu

Test sensor: AMBA

Number of tests: 12

Aktualni krok: 1

IR camera

Test start: 15:47:48

Test stop: 15:48:16

Aktualni krok: 2

Main characteristic

Test start: 15:48:16

Prumerny proud senzorem: 4.5mA

Test stop: 15:53:43

Aktualni krok: 3

Blesk

Test start: 15:53:43

Prumerny proud senzorem: 4.3mA

Test stop: 15:59:21

Aktualni krok: 4

LED Ambient test (H 3)

Test start: 15:59:21

Prumerny proud senzorem: 4.5mA

Test stop: 16:04:59

Aktualni krok: 5

LED Ambient test (H 4)

Test start: 16:04:59

Prumerny proud senzorem: 4.7mA

Test stop: 16:10:37

Aktualni krok: 6

LED Ambient test (H 6)

Test start: 16:10:37

Prumerny proud senzorem: 4.4mA

Test stop: 16:16:15

Aktualni krok: 7

LED 50 Hz test (H 3)

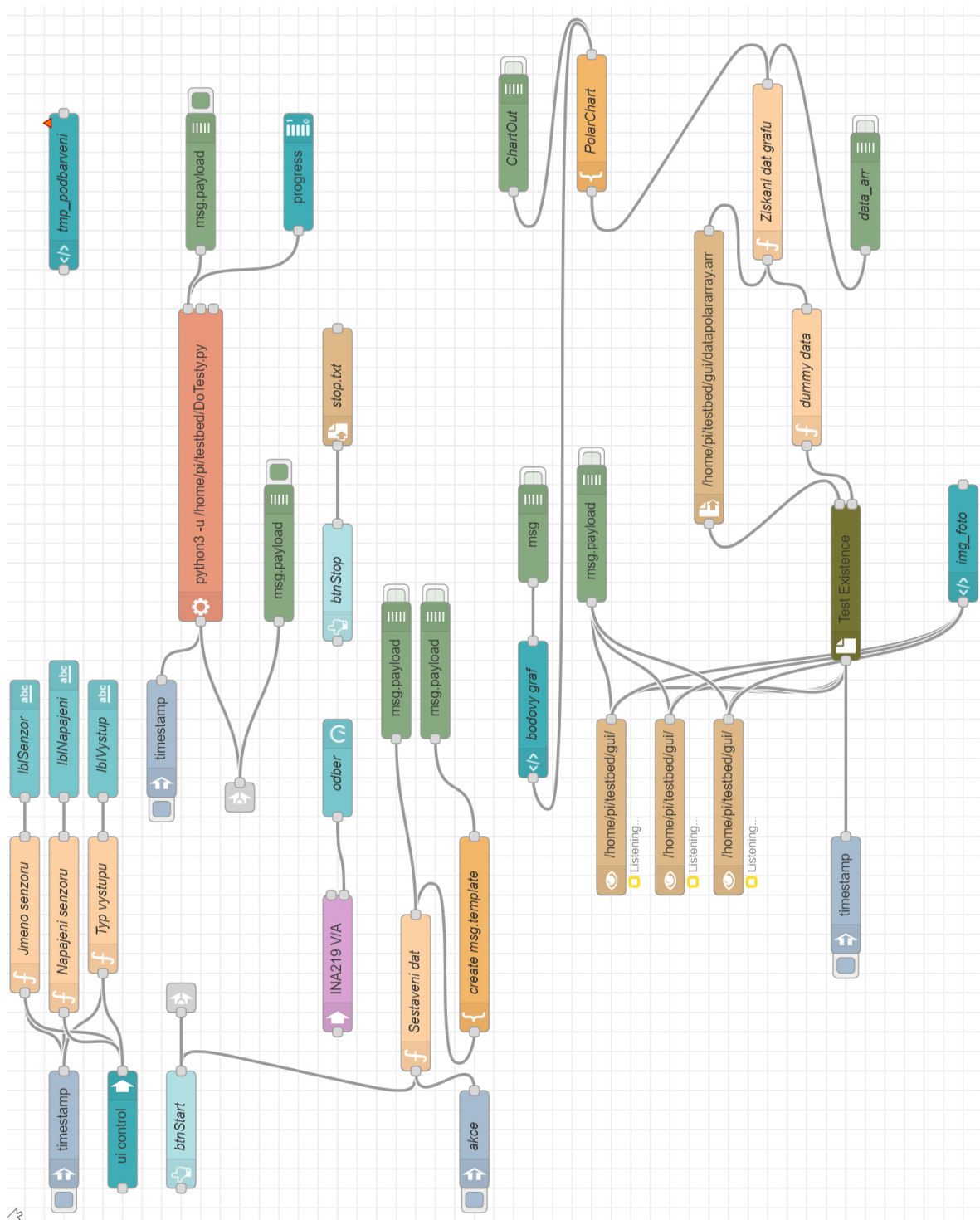
Test start: 16:16:15

Prumerny proud senzorem: 4.4mA

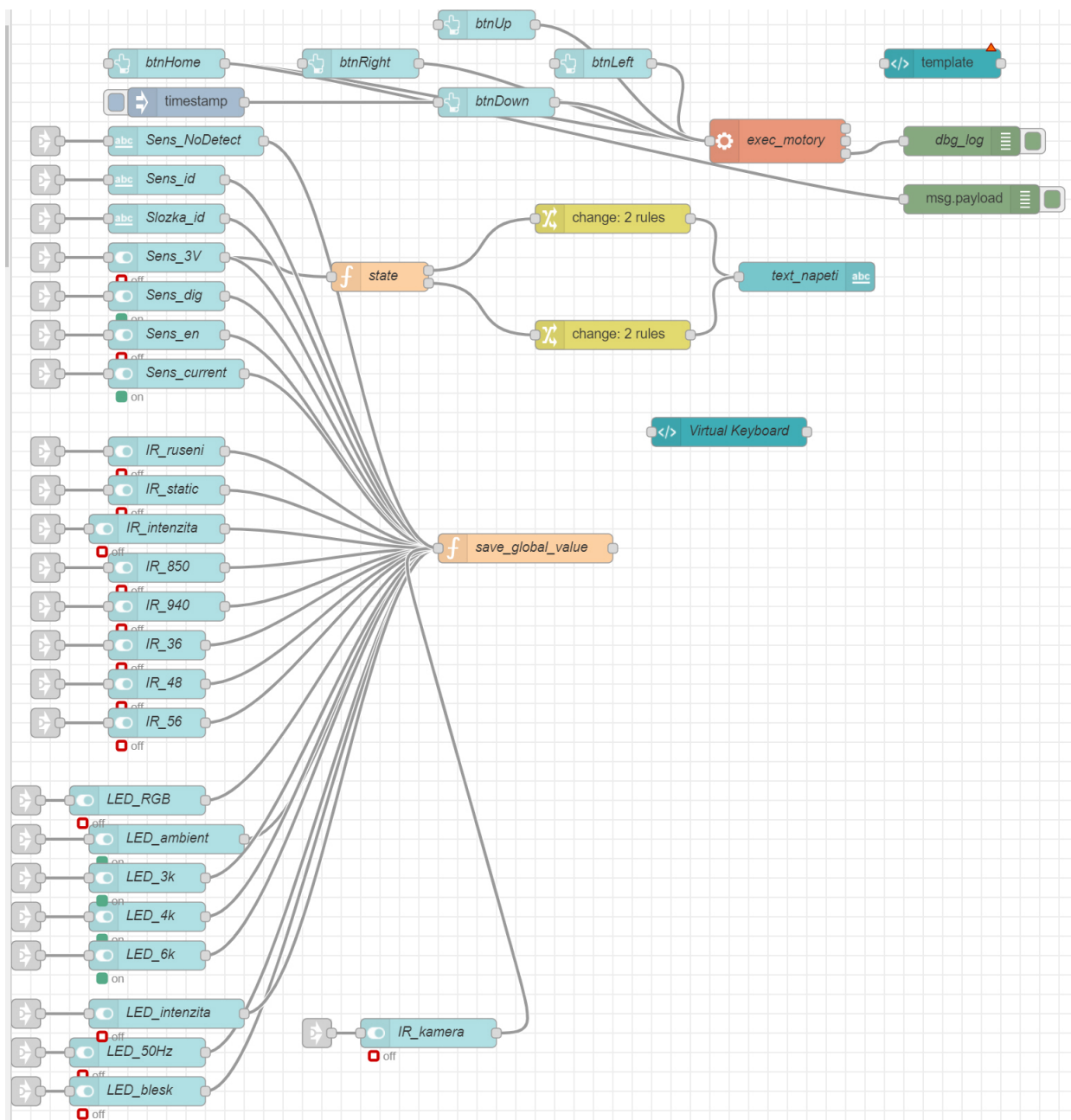
Test stop: 16:21:43



## F Node-RED - Definice stránky průběhu testu



## G Node-RED - Definice stránky nastavení testu





# I Vstupní převodní a transformační matice

Vstupní převodní matice										
	Rozměry [objem v cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost [g]	Doba odezvy [ms]	Detekční vzdálenost [cm]	Proud [mA]	Cena [Kč]	Ozářená plocha [cm <sup>2</sup> ]	Vliv denního osvětlení	Vliv umělého osvětlení [50 Hz] bez vlivu	Vliv IR rušení [940 nm, 48 kHz] bez vlivu
1	< 2,00	< 3,00	< 2,00	< 20,00	< 5,00	< 200	< 10,00	bez vlivu	bez vlivu	bez vlivu
2	2,00 – 4,99	3,00 – 5,99	2,00 – 4,99	20,00 – 29,99	5,00 – 9,99	200 – 499	10,00 – 29,99	malý vliv	malý vliv	malý vliv
3	5,00 – 9,99	6,00 – 8,99	5,00 – 9,99	30,00 – 39,99	10,00 – 14,99	500 – 799	30,00 – 59,99	střední vliv	střední vliv	střední vliv
4	≥ 10,00	≥ 9,00	10,00 – 19,99	≥ 40	15,00 – 24,99	≥ 800	60,00 – 99,99	velký vliv	velký vliv	velký vliv
5			≥ 20		≥ 25		≥ 100			
Transformační matice s prioritou: Doba odezvy, Detekční vzdálenost, Proud										
1	Rozměry	Hmotnost	Doba odezvy	Detekční vzdálenost	Proud	Cena	Ozářená plocha	Vliv denního osvětlení	Vliv umělého osvětlení	Vliv IR rušení
1	100	100	500	0	180	100	70	100	100	100
2	80	90	480	100	200	95	85	100	85	70
3	60	80	430	280	185	30	100	60	60	50
4	30	70	300	300	100	10	80	10	10	10
5			5		50		50			
1800	100	100	500	300	200	100	100	100	100	100
Transformační matice s prioritou: IR rušení, Doba odezvy, Rozměry, Detekční vzdálenost										
2	Rozměry	Hmotnost	Doba odezvy	Detekční vzdálenost	Proud	Cena	Ozářená plocha	Vliv denního osvětlení	Vliv umělého osvětlení	Vliv IR rušení
1	200	100	300	0	80	80	70	100	100	800
2	190	95	250	50	100	100	85	90	90	100
3	180	40	200	180	80	70	100	30	50	10
4	80	10	25	200	40	20	80	10	10	0
5			5		10		30			
2200	200	100	300	200	100	100	100	100	100	800

## J Stavová matice senzorů I

[illegible]

## K Stavová matice senzorů II

[illegible]

## L Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenová složka CD
├── bp ..... pdf dokument bakalářské práce
│   └── bakalarska_prace.pdf
├── data ..... naměřená data senzorů
│   ├── AMBA ..... data a grafy pro senzor AMBA
│   ├── E18D80 ..... data a grafy pro senzor E18
│   ├── JSUMO ..... data a grafy pro senzor JSUMO
│   ├── POLOLU ..... data a grafy pro senzor POLOLU
│   ├── SEN0164 ..... data a grafy pro senzor SEN
│   └── SHARP2Y ..... data a grafy pro senzor SHARP
├── obrazky_mereni ..... obrázky grafů měření ve formátu jpg
│   ├── AMBA ..... grafy měření pro senzor AMBA
│   ├── E18D80 ..... grafy měření pro senzor E18
│   ├── JSUMO ..... grafy měření pro senzor JSUMO
│   ├── POLOLU ..... grafy měření pro senzor POLOLU
│   ├── SEN0164 ..... grafy měření pro senzor SEN
│   └── SHARP2Y ..... grafy měření pro senzor SHARP
├── rozhodovaci_system ..... rozhodovací systém pro hodnocení senzorů
│   └── Testbed_FuzzyDT.xlsx
├── src ..... zdrojové soubory
│   ├── Arduino_DUE ..... zdrojové kódy pro Arduino DUE (Wiring C)
│   ├── NodeRED ..... zdrojový kód pro prostředí Node-RED (JSON)
│   └── RaspberryPi4 ..... zdrojové kódy pro Raspberry Pi (Python)
└── video ..... ukázka činnosti zařízení
    └── bp_mereni.mp4
```